



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**NÁVRH TESTOVACÍHO PŘÍPRAVKU
PIEZOELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ PVDF VRSTVY**

DESIGN OF TESTER OF PIEZOELECTRIC PVDF LAYERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Simona Sijková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Studentka: **Bc. Simona Sijková**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh testovacího přípravku piezoelektrických vlastností PVDF vrstvy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem práce je analyzovat použití PVDF materiálů v inženýrské praxi a prezentovat jejich potenciál. Vzhledem k procesu výroby polymerových piezoelektrických materiálů není vhodné použít standardní metody k měření piezoelektrických vlastností těchto materiálů. Pro zhodnocení jejich využitelnosti v oblasti aktivních senzorů bude sestavena konstrukce testovacích přípravku, který bude unifikovaně testovat elektrické odezvy a tím vyhodnotí vhodnost jednotlivých polymerických vrstev a nanostruktur z PVDF materiálů pro senzorické aplikace.

Cíle diplomové práce:

- 1) rešerše využití PVDF struktur pro snímání dynamického chování
- 2) analýza odezvy struktury v jednotlivých směrech dle procesu výroby
- 3) návrh konstrukce testeru pro stanovení odezvy na unifikované dynamické buzení
- 4) vyhodnocení odezvy struktury a jejich elektromechanických parametrů
- 5) analýza parametrů struktury vzhledem k senzorickému použití pro vibrodiagnostiku

Seznam doporučené literatury:

KIM, H., Y. TADESSE a S. PRIYA, 2009. Piezoelectric Energy Harvesting, Energy Harvesting Technologies. Editoři S. Priya and D. J. Inman.

ANTON, S. R. a H. A. SODANO, 2007. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006). Smart Materials and Structures.

ZHAO, P., S. WANG a A. KADLEC, 2016. Piezoelectric and dielectric properties of nanoporous polyvinylidene fluoride (PVDF) films. SPIE Proceedings Volume 9800, Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites 2016, s 98000P.

MRLÍK, M., S. LEADENHAM, M. A. ALMAADEED a A. ERTURK, 2016. Figure of merit comparison of PP-based electret and PVDF-based piezoelectric polymer energy harvesters. SPIE Proceedings Volume 9799, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2016, s. 979923.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstract

The diploma thesis deals with a design of a tester device, a selection and verification of a suitable method for comparing the piezoelectric properties of tested PVDF samples. In the introduction, a basic overview of the theory is important to understand the issue and the various branches of use of PVDF in the field of energy harvesting. The tester device includes a unimorph piezoelectric cantilever beam with tip mass, whose properties are described by three models: a model with N degrees of freedom reduced to one degree of freedom (NDOF), a single degree of freedom model (SDOF), both created in Matlab and a model for verifying results in FEM ANSYS Workbench program. The voltage time response and the voltage frequency response of the models is compared with each other. For two different PVDF samples, the voltage response to harmonic excitation is measured using a tester device, and the piezoelectric properties of one of them are determined using the NDOF and SDOF models.

Key words

piezoelectric constant, piezoelectric properties, electromechanical coupling, energy harvesting, PVDF, mode 31, cantilever beam, response, finite element method, reduction of degrees of freedom, Matlab, ANSYS Workbench

Abstrakt

Diplomová práca sa zaoberá návrhom prípravku, zvolením a overením vhodnej metódy pre porovnanie piezoelektrických vlastností testovaných vzoriek PVDF. V úvode práce je základný prehľad teórie dôležitý k porozumeniu danej problematike a rôzne odvetvia využitia PVDF v oblasti energy harvesting. Súčasťou prípravku je jednomorfny piezoelektrický nosník s hmotou, ktorého vlastnosti popisujú tri modely: model s N stupňami voľnosti redukovaný na jeden stupeň voľnosti (NDOF), model s jedným stupňom voľnosti (SDOF), oba vytvorené v prostredí Matlab a model pre overenie výsledkov v MKP programe ANSYS Workbench. Napäťová odozva modelov je vzájomne porovnaná v čase a vo frekvenčnom spektre. Pre dve rôzne vzorky PVDF je pomocou testovacieho prípravku nameraná skutočná napäťová odozva na harmonické budenie a pomocou modelov NDOF a SDOF sú stanovené piezoelektrické vlastnosti jednej z nich.

Kľúčové slová

piezoelektrická konštanta, piezoelektrické vlastnosti, člen elektromechanickej premeny, energy harvesting, PVDF, mód 31, nosník, odozva, metóda konečných prvkov, redukcia stupňov voľnosti, Matlab, ANSYS Workbench

Bibliografická citácia

SIJKOVÁ, Simona. Návrh testovacího přípravku piezoelektrických vlastností PVDF vrstvy [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124325>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Zdeněk Hadaš.

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že som diplomovú prácu vypracovala samostatne pod vedením vedúceho práce a v zozname som uviedla všetky literárne a odborné zdroje.

Brno 26. 6. 2020

.....
Bc. Simona Sijková

Podakovanie

Predovšetkým sa chcem poďakovať vedúcemu práce doc. Ing. Zdeňkovi Hadašovi, Ph.D., za odborné vedenie, konzultácie, pripomienky, návrhy k práci a takisto za trpezlivosť a ochotný prístup.

Srdečná vďaka patrí mojej rodine za podporu počas celej doby štúdia.

Bc. Simona Sijková

Obsah

Úvod	15
1 Motivácia a cieľ práce	17
2 Piezoelektrický jav	19
2.1 Princíp	19
2.2 Piezoelektrické materiály	20
2.2.1 Kryštalické a keramické materiály	20
2.2.2 Polymérne materiály	20
2.2.3 Kompozitné materiály	21
2.2.4 Smer polarizácie a módy namáhania	22
3 Polyvinylidén difluorid	25
3.1 Štruktúry	25
3.1.1 Fólia	25
3.1.2 Nanovláknové polia a siete	26
3.1.3 Nanotrubice	27
3.2 Kompozity	27
3.2.1 Titaničitán barnatý	28
3.2.2 Oxid zinočnatý	28
3.2.3 Grafén	29
3.3 Vlastnosti	30
3.3.1 Permitivita	31
3.3.2 Elastická poddajnosť	31
3.3.3 Piezoelektrické konštanty	32
3.3.4 Elektromechanický k-faktor	33
3.4 Porovnanie vlastností	33
4 Snímanie pomocou energy harvesting	35
4.1 Monitorovanie zdravia	35
4.2 Snímanie pohybu ľudského tela	36
4.2.1 Snímanie dotyku	37
4.3 Vibrodiagnostika	38
4.3.1 Potrubie	38
4.3.2 Most	40
4.3.3 Kolajnice	42
5 Modely jednomorfného piezoelektrického nosníka	45
5.1 Model s N stupňami voľnosti - NDOF	45
5.1.1 Euler-Bernoulliho teória	45
5.1.2 Hamiltonov princíp	47
5.1.3 Sústava vo fyzikálnych súradniciach	47
5.1.4 Okrajové podmienky	48

5.1.5	Modálne vlastnosti	48
5.1.6	Redukcia z N na jeden stupeň voľnosti	49
5.2	Model s jedným stupňom voľnosti - SDOF	51
5.3	Model v MKP programe	52
6	Odozva piezoelektrického nosníka v modeloch	55
6.1	Odozva v časovej oblasti	55
6.1.1	Pomerný útlm	55
6.1.2	Voľné tlmené kmitanie	56
6.2	Odozva vo frekvenčnej oblasti	57
6.2.1	Harmonické budenie	57
6.3	Piezoelektrické vlastnosti	58
6.3.1	Piezoelektrické konštanty e_{31} , d_{31}	58
6.3.2	Elektromechanický faktor premeny k_{31}	58
7	Odozva piezoelektrického nosníka z experimentu	59
7.1	Skúšobný aparát	59
7.2	Parametre experimentálnej sústavy a modelov	60
7.3	Overenie lineárneho správania	60
7.4	Napätová odozva vo frekvenčnej oblasti	62
7.5	Elektrický výkon	63
8	Určenie piezoelektrických vlastností	65
8.1	Piezoelektrické konštanty z napätia	65
8.2	Piezoelektrické konštanty z napätia a z rýchlosti	66
8.3	Faktory ovplyvňujúce sústavu	68
8.4	Zhrnutie výsledkov	68
9	Záver	71
	Zoznam použitej literatúry	73
	Zoznam použitých symbolov a skratiek	81
	Zoznam obrázkov	85
	Zoznam tabuliek	87
	Prílohy	89
A	Priložené súbory	89

Úvod

Rýchlo rozvíjajúce sa mestá, priemyselné oblasti, zhusťovanie premávky, to všetko je charakteristiké pre dnešný moderný svet. Budovanie dopravnej infraštruktúry vrátane mostov či iných stavebných objektov sú časovo a finančne náročné pre rozpočet každého štátu. Výsledné stavby sú počas svojho života namáhané rôznymi vonkajšími vplyvmi, z ktorých nezanedbateľnú časť tvoria vibrácie. Práve vibrácie sú často sprievodným javom mnohých porúch a na ich základe je možné tieto defekty zistiť či lokalizovať. Po výstavbe je preto dôležité dôkladne zvážiť aj systém zabezpečujúci kontrolu stavebných diel pre včasné odhalenie väd a dosiahnutie čo najdlhšej životnosti, no náklady na takýto systém sú často vysoké.

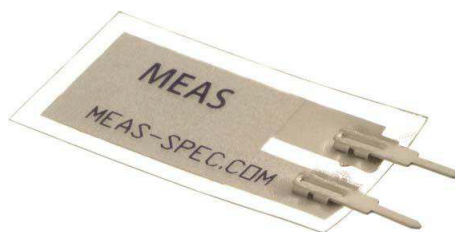
Preto sa pozornosť sa upriamuje na vibrácie ako alternatívny zdroj energie a potenciál ich využitia. Pri monitorovaní sa v ideálnom prípade hovorí zväčša o samostatne fungujúcom senzore schopnom bezdrôtovej komunikácie, v iných prípadoch stačí náhrada komerčného senzora kompaktnjším, menej nákladným a rovnako spoľahlivým snímačom. Organizácia siete takýchto zariadení so zasielaním informácií o stave dáva vyhotoviteľom kontrolu nad systémom bez nutnej prítomnosti v teréne. Aj takéto aplikácie zahŕňa energia harvesting ako rozsiahla oblasť zaoberajúca sa získavaním a využívaním nielen energie z vibrácií, ale napríklad aj z tepla, slnečného žiarenia, prúdenia kvapaliny či vzduchu. V prípade vibrácií môže byť energia harvesting založený na elektromagnetickom, elektrostatickom alebo piezoelektrickom jave.

Energia harvesting zariadenia využívajúce piezoelektrický jav nie sú spojené len s vibráciami stavebných systémov či dopravných prostriedkov, predmetom sledovania môžu byť napríklad aj vitálne funkcie ľudského tela alebo jeho podmienené pohyby či iné dynamické deje. Jedným z materiálov, u ktorého sa zároveň vyzdvihuje biokompatibilita pre využitie v medicínskej technike a vysoká citlivosť, je aj PVDF. Materiál, ktorého potenciál sa zvyšuje s pokrokom vývoja jeho výroby.

1 Motivácia a cieľ práce

Využitie piezoelektrického javu v oblasti snímania pomocou energy harvesting je stále čoraz rozšírenejšie. Existuje niekoľko skupín piezoelektrických materiálov, ktoré podľa vlastností predurčujú možnosť ich využitia. Keramické materiály, ktorých prímiesou bývalo olovo smerujú kvôli ekologickému hľadisku do úzadia a v aplikáciách vyžadujúcich flexibilitu nachádzajú svoje uplatnenie snímače z materiálu odolného voči väčším ohybom, napríklad senzory vyrobené z PVDF štruktúr. Ukážka možného prevedenia takéhoto snímača je na obrázku 1.1.

Nespornou výhodou okrem ohybnosti je, že senzory vyrobené z PVDF sú nielen biokompatibilné, ale vyznačujú sa aj vysokou citlivosťou pre široký frekvenčný rozsah. To predurčuje PVDF štruktúry okrem iného aj pre snímame v súvislosti s činnosťou ľudského tela. Na druhú stranu majú PVDF štruktúry oproti keramickým piezoelektrickým materiálom rádovo nižšiu schopnosť premeny energie, preto sa u menších zariadení zväčša nejedná o ukladanie energie ale o podávanie informácie o stave.



Obrázok 1.1: Piezoelektrický senzor z PVDF fólie [1].

Rôzne výrobné procesy majú za následok usporiadanie PVDF do štruktúr majúcich iné piezoelektrické vlastnosti napriek tomu, že chemické zloženie tohto materiálu je stále rovnaké. Od objavenia piezoelektrických vlastností PVDF materiálu ubehlo už polstoročie, no prudký rozvoj techniky a dispozícia tohoto materiálu umožňujú piezoelektrické vlastnosti stále zlepšovať výrobnými technológiami či rôznymi prímiesami tvoriacimi spolu s PVDF kompozit.

Účelom tejto práce je navrhnuť prípravok, zvoliť vhodnú metódu pre testovanie piezoelektrických vlastností daných vzoriek a overiť jej správnosť. Výstupom je možnosť porovnať vlastnosti jednotlivých vzoriek z rôznych výrobných procesov.

2 Piezoelektrický jav

Kapitola stručne zhŕňa princíp piezoelektrického javu, skupiny, do ktorých sa piezoelektrické materiály zaraďujú, a módy, v ktorých môže byť materiál namáhaný podľa smeru polarizácie.

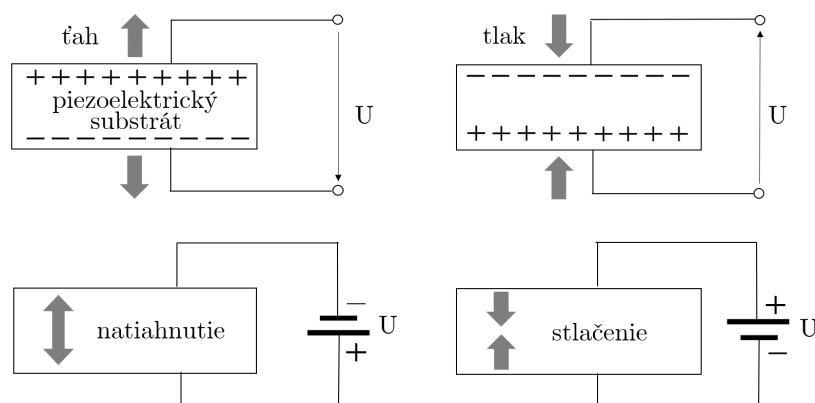
Obrázok 2.1 sumarizuje javy prevádzajúce vstupy a výstupy zariadenia vyrobeného z určitého materiálu. Mimodiagonálne javy v tabuľke sú charakteristické pre takzvané smart materiály, prerušovaný rámik vymedzuje javy, ktoré sú využívané pre snímanie, naopak v plnom rámkiku sú javy využívané v aktuátoroch.

vstup \ výstup	náboj prúd	magnetizácia	pretvorenie	teplota	svetlo
elektrické pole	permitivita vodivosť	elektromagnetizmus	inverzný piezoelektrický jav	elektrokolorický jav	elektrooptický jav
magnetické pole	elektromagnetizmus	permeabilita	magnetostrikcia	magnetokolorický jav	magnetooptický jav
napätie	piezoelektrický jav	piezomagnetický jav	elastická konštanta	-	fotoelastický jav
teplo	pyroelektrický jav	-	tepelná rozťažnosť	merné teplo	-
svetlo	fotovoltaický jav	-	fotostrikcia	-	refrakčný index

Obrázok 2.1: Rozličné javy v materiáloch [2].

2.1 Princíp

V roku 1880 bola bratmi Curieovými pozorovaná schopnosť istých materiálov vytvárať elektrický náboj na ich povrchu pri pôsobení mechanického napätia. Jav bol nazvaný ako priamy piezoelektrický jav a po nejakom čase bola dokázaná aj existencia inverzného piezoelektrického javu, čo znamená, že isté materiály sa mechanicky deformujú, ak je k nim pripojený zdroj elektrickej energie. Oba tieto javy sú znázornené na obrázku 2.2.



Obrázok 2.2: Schéma priameho (hore) a inverzného (dole) piezoelektrického javu [3].

2.2 Piezoelektrické materiály

Delenie piezoelektrických materiálov je rôzne, no v zásade existujú štyri hlavné skupiny, a to kryštalické, keramické, polymérne a kompozitné materiály. Materiály každej skupiny sa odlišujú mechanickými, elektrickými i piezoelektrickými vlastnosťami a dôsledkom toho aj ich využitím v praxi.

2.2.1 Kryštalické a keramické materiály

Kryštalické materiály

Piezoelektrický jav bol objavený na kryštalických materiáloch, medzi ktoré patria napríklad kremeň, Seignettova soľ, topaz a turmalínové skupiny. Kryštály sa síce vyznačujú vysokou stabilitou, no ich najväčšou nevýhodou je nízka schopnosť premeny mechanickej energie na elektrickú a opačne v porovnaní s ostatnými piezoelektrickými materiálmi. Tento fakt je zapríčinený nízkymi hodnotami relatívnej permitivity a piezoelektrickej nábojovej konštanty popísanými v kapitole 3.3. Kryštalické materiály v dnešnej dobe stále zmenšujú svoje pole pôsobnosti, no využitie si zachoval napríklad kryštál kremeňa, ktorý nachádza svoje uplatnenie v elektrotechnike ako kryštálový rezonátor.

Keramické materiály

Ku sklonku druhej svetovej vojny bol vyvinutý prvý piezokeramický materiál BaTiO_3 (titaničitan barnatý) využívaný pre ultrazvukové (elektroakustické) čidlá [4]. Významným milníkom v oblasti piezokeramických materiálov sa stal rok 1952 [5], kedy bola vyvinutá PZT keramika, čo je zmesný oxid olova, titánu a zirkónia. Aj keď bol PZT počas desiatok rokov vďaka svojim vlastnostiam najviac používaný piezoelektrický materiál, zaraďuje sa medzi toxické materiály kvôli obsahu olova.

K ďalším keramikám s obsahom olova patria PbTiO_2 (zmesný oxid olova a titánu) a PbZrO_3 (zmesný oxid olova a zirkónia) [6]. V súčasnosti sú vyhľadávané rôzne alternatívy týchto materiálov tak, aby spĺňali reštrikciu používania olova v elektronických zariadeniach.

Keramické materiály spolu s kryštalickými je možné spolu zaradiť do skupiny anorganických piezoelektrických materiálov.

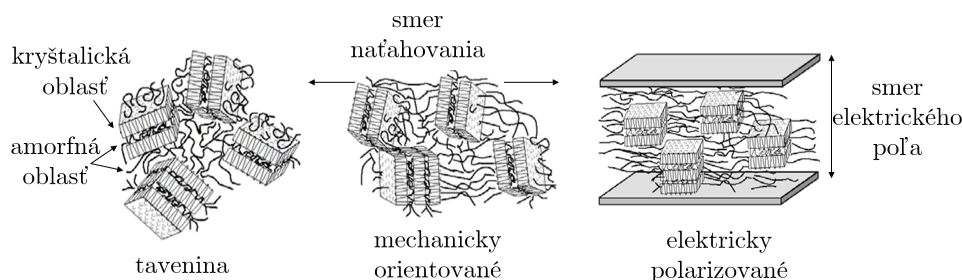
2.2.2 Polymérne materiály

Prvé objavené biologické materiály s piezoelektrickými vlastnosťami boli polyméry celulózy a kolagénu, avšak s veľmi nízkym koeficientom premeny energie. V roku 1969 objavil Heiji Kawai piezoelektrické vlastnosti na materiáli PVDF (polyvinylidén fluorid) [7]. Piezoelektrické sú taktiež jeho kopolyméry PVDF-TrFE (polyvinylidén fluorid trifluóretylén), PVDF-TFE (polyvinylidén fluorid tetrafluóretylén), PVDF-HFP (polyvinylidén fluorid hexafluoropropán) [4, 8, 9]. Piezoelektrické polyméry sú organické materiály a podľa štruktúry sa delia na dve skupiny: semikryštalické a amorfné polyméry.

Semikryštalické polyméry

U semikryštalických polymérov určuje piezoelektrické vlastnosti stupeň kryštalizácie, tzn. ako sú oblasti s kryštálmi náhodne rozmiestnené medzi amorfnými usernameami. Za účelom

získania lepších piezoelektrických vlastností môže byť orientácia kryštálov v materiáli modifikovaná mechanickou úpravou (natahovanie) či použitím vysokého napätia (elektrická polarizácia) [3]. Na obrázku 2.3 je znázornené usporiadanie semikryštalického polyméru pred a po uvedených úpravách. K tejto skupine patria: PVDF, PVDF-TrFE, PVDF-TFE, polyamidy (nylony), polyméry tvorené tekutými kryštálmi, polyurey, Parylen-C [10] a biopolyméry (kolagén, polypeptidy, chitín, keratín [3, 11]).



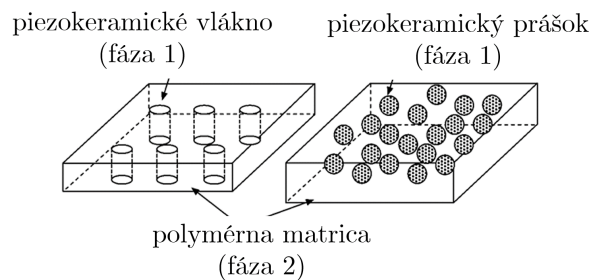
Obrázok 2.3: Usporiadanie kryštalických a amorfných oblastí PVDF polyméru. Zľava: po tepelnej úprave, po mechanickom ťahaní, po elektrickom polarizovaní [11].

Amorfné polyméry

Polymérne reťazce náhodne usporiadané bez akéhokolvek vzťahu k susedným polymérnym reťazcom sú charakteristické pre amorfné polyméry [12]. Zlepšenie piezoelektrických vlastností sa dosahuje elektrickým polarizovaním. Výhodou oproti semikryštalickým polymérom je lepšia poddajnosť, no naopak nevýhodou horšie piezoelektrické vlastnosti. K amorfným polymérom sa zaraďujú nitrilom nahradené polyméry (PAN, PVDCN/Vac, PPEN), polyvinylchlorid (PVC) a polyvinylacetát (PVAc) [11].

2.2.3 Kompozitné materiály

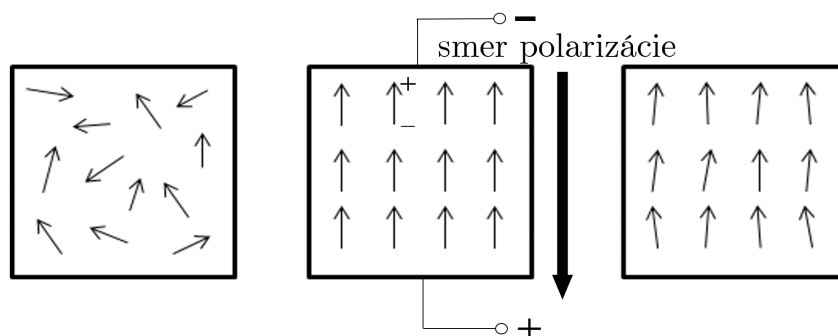
Pojem piezoelektrický kompozit poníma vo všeobecnosti materiál, v ktorom je aspoň jedna fáza piezoelektrická a okrem nej sa v kompozite nachádza ešte jedna či viacero iných fáz. Veľmi časté býva spojenie piezokeramiky s polymérmi či s piezopolymérmi, no takisto sa využíva spojenie piezopolymérov s vodivými i nevodivými materiálmi. Pridávanie fázy do matrice polyméru môže byť vo forme mikročastíc alebo nanočastíc, vlákien či tyčín [10, 13]. Takto vyrobený materiál je pripravený na použitie alebo na ďalšie techniky zlepšenia vlastností, najčastejšie je to polarizácia.



Obrázok 2.4: Kompozit PZT a polyméru pomocou vláken (vlavo) a pomocou nanočastíc (vpravo) [14].

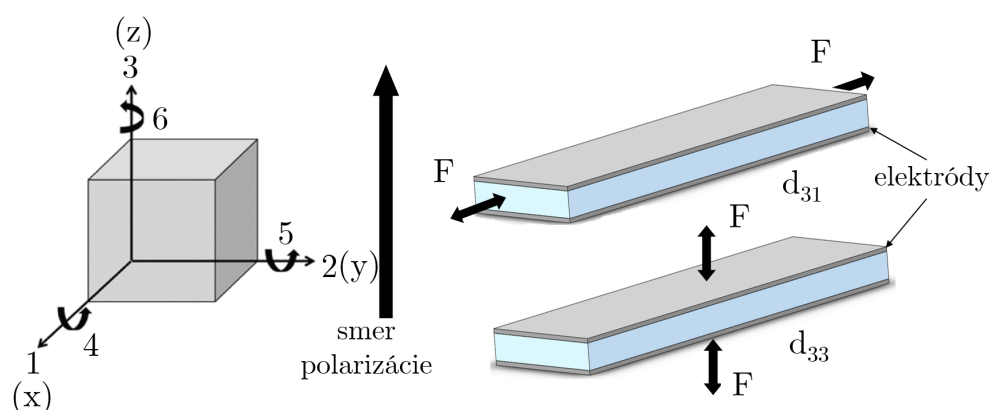
2.2.4 Smer polarizácie a módy namáhania

Väčšina piezoelektrických materiálov m bezprostredne po výrobnom procese náhodne orientovan domény. Pôsobením elektrického poľa a teploty sú tieto domény usporiadan vzhľadom na elektrick pole a potom, čo elektrick pole a teplota prestanú pôsobiť, sa domény síce vychlia zo získanej pozície, no do pôvodnej pozície sa nevrátia úplne. V materiáli ostane zvyškov polarizácia s jednoznačným smerom.



Obrázok 2.5: Proces polarizovania materiálu. Zlava: pred, počas a po polarizácii [15].

Piezoelektrick materiály sú anizotropne. Zároveň pre ne existuje konvencia smerov v pravouhlom krytalografickom systéme vidí obrázok 2.6 vlavo. Smery 1, 2 a 3 sa stotonj v poradí s osami x , y , z , kde os z je toton s smerom polarizácie. Smery 4, 5 a 6 definujú krut v osch x , y , z [8]. Vo vobecnosti sa pri elektromechanických konštantách používajú módy s indexmi i , j (md ij). Index i označuje smer polarizácie a j označuje smer pôsobenia sily.



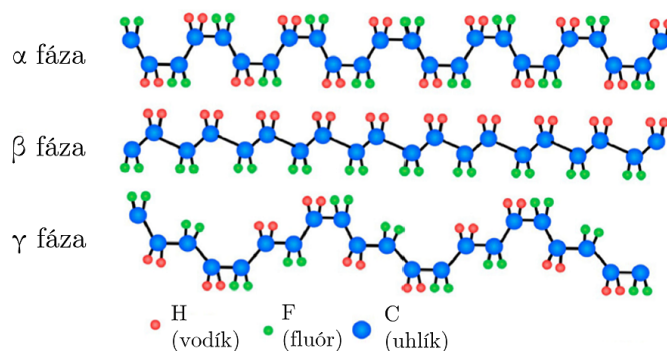
Obrázok 2.6: Konvencia smerov (vľavo) [8] a namáhanie v móde 31 a 33 [16].

Piezoelektrické keramické a polymérne materiály sú zvyčajne plošne ortotropné v rovine kolmo na smer polarizácie, preto je mód 31 rovný módu 32. V oblasti energy harvesting sú zaužívané smery 1 a 3. Na obrázku 2.6 sú znázornené používané módy namáhania: mód 31 a mód 33.

3 Polyvinylidén difluorid

Najlepšie piezoelektrické vlastnosti spomedzi organických materiálov majú PVDF štruktúry. Polyvinylidén difluorid je semikryštalický piezoelektrický polymér syntetizovaný polymerizáciou $\text{H}_2\text{C}=\text{CF}_2$ monomérov. Záležiac na výrobnom procese je jeho kryštalickosť zvyčajne 50 až 60 % [11].

V tuhom skupenstve môže byť v PVDF štruktúre prítomných celkom päť kryštalických fáz: α , δ fáza v konformácii reťazca *trans-gauche-trans-gauche'* (TG $\overline{\text{TG}}$ '), β fáza v konformácii reťazca *all-trans* (TTTT) a γ , ε fáza (T3GT3G') [17]. Najviac zastúpená fáza je α , no z pohľadu energy harvesting sa vyžaduje dosiahnutie čo najvyššieho obsahu β fázy.



Obrázok 3.1: Konformácie reťazcov α , β , γ fázy v PVDF [9].

Každý reťazec monoméru PVDF má dipólový moment kolmo na polymérny reťazec. V momente spojenia reťazcov β fázy vzniká paralelné spojenie a celkový dipólový moment, ktorý je nenulový, preto je β fáza polárna a piezoelektrické vlastnosti sú závislé na jej obsahu. Naopak, v prípade α fázy sa reťazce spoja antiparalelne a dipólový moment sa zruší, preto je táto fáza nepolárna [18]. Fáza γ je tiež polárna, no dosiahnuť a zvýšiť jej obsah v PVDF je technologicky omnoho náročnejšie než u β fázy.

3.1 Štruktúry

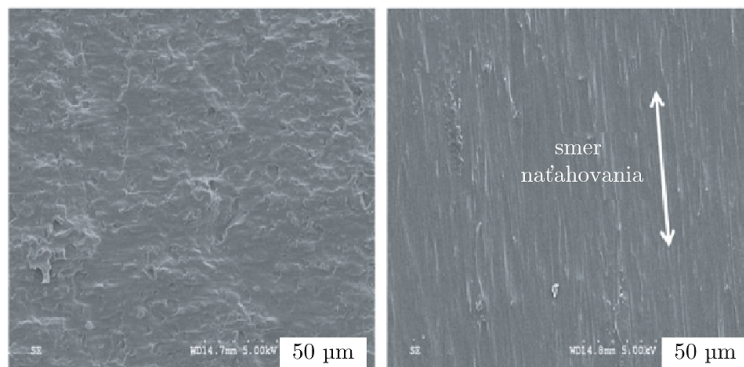
Polymér PVDF môže v závislosti na výrobnom procese formovať niekoľko štruktúr. Zatiaľ čo pre namáhanie v móde 31 sa využívajú fólie, nanoštruktúry ako nanovlákná, nanotrubic a nanodrôty sú uprednostňované pre mód 33.

3.1.1 Fólia

Výroba PVDF fólie je spomedzi ostatných štruktúr najjednoduchšia, najčastejšie je správaná liatím roztoku (solution casting), odprarovaním rozpúšťadla (solvent evaporation) alebo odstredivým nanášaním vrstvy (spin coating). V takto vyrobených fóliách je nízky obsah β fázy a pre energy harvesting aplikácie sa obsah β fázy zvyšuje natahovaním, viď obrázok 3.2.

Počas procesu sú molekulové reťazce PVDF narovnávané a materiál je súčasne vystavený vysokému napätiu (polarizácia viď kapitola 2.2.4), čo vybudí orientovanie elektrických dipólov podľa smeru tohto elektrického poľa. Vysoké napätie spôsobuje zahrievanie

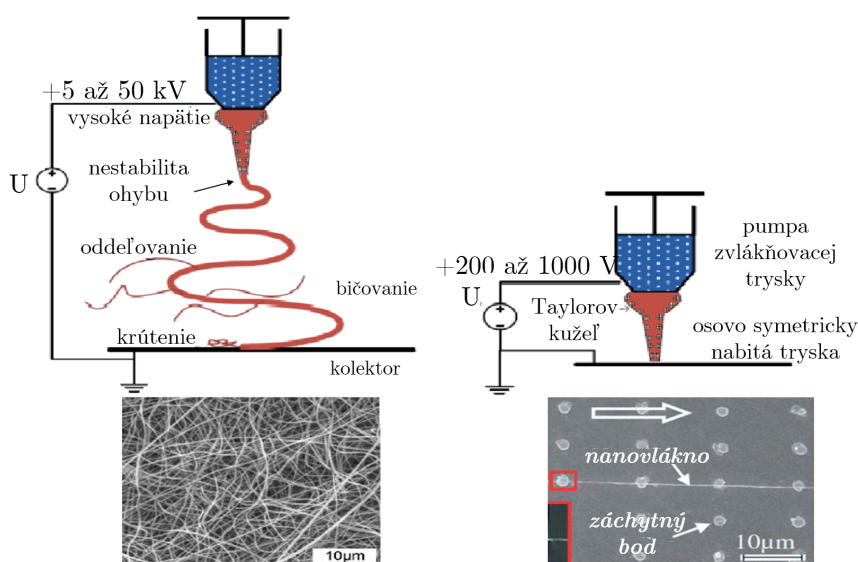
materiálu, a tak je nutné dbať na to, aby PVDF fólia nedosiahla Curieho teplotu a tým nedošlo k nežiadúcej strate piezoelektrických vlastností.



Obrázok 3.2: SEM obrázok PVDF fólie bez úpravy a po natahovaní [19].

3.1.2 Nanovláknové polia a siete

Dopyt po lepších piezoelektrických vlastnostiach viedol k iným technikám výroby PVDF. Veľmi populárnou metódou výroby sa stalo elektrostatické zvlákňovanie (elektrospinning). Tekuté PVDF je cez takzvanú snovacíu hlavicu či ihlu v malých množstvách pumpované na jej ústie, z ktorého sú vysokým elektrickým poľom vyťahované spojité vlákna PVDF dopadajúce na kolektor. Pri výrobe PVDF sa využívajú dve metódy elektrostatického zvlákňovania, a to FFES (far field electro spinning) a NFES (near field electro spinning). Výsledné nanovlákná môžu mať náhodné usporiadanie (metóda FFES) alebo môžu byť usporiadané podľa daných záchytných bodov (metóda NFES). Na obrázku 3.3 je znázornený princíp oboch metód a porovnanie usporiadania výsledných vlákien na fotografii z elektrónového mikroskopu (SEM).

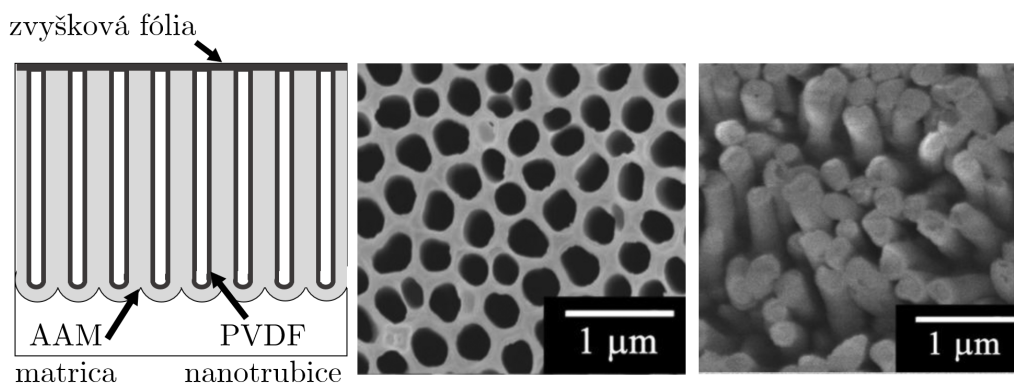


Obrázok 3.3: Porovnanie metód elektrostatického zvlákňovania: FFES (vľavo), NFES (vpravo) [20].

Pri FFES dochádza k nestabilite v ohybe, k rozdeľovaniu a k deformácii dopadajúcich vlákien v dôsledku elektrického odpudzovania medzi časťami jedného vlákna či vlákien vzájomne medzi sebou [20], čo je dôsledkom náhodného usporiadania vlákien. Štruktúry sa preto nazývajú nanovláknové siete. Pri NFES metóde môžu byť vlákna usporiadavané ako v 2D, tak i v 3D priestore, preto nesú pomenovanie nanovláknové polia.

3.1.3 Nanotrubice

Nanotrubice z PVDF sa vyrábajú pomocou odstrániteľnej formy, konkrétne z matrice anodického oxidu hlinitého, a metóda je založená na schopnosti tekutého polyméru vsať do stien tejto nanoporóznej formy [9]. Výsledkom je pole usporiadaných nanotrubíc majúcich žiadanú orientáciu dipólov aj po odstránení matrice. Na obrázku 3.4 je schéma nanotrubicového poľa a výsledné usporiadanie trubíc na SEM fotografii. Takto vyrobené nanotrubice majú síce oveľa lepšie piezoelektrické vlastnosti než PVDF fólia, no technológia výroby je problematická prihladnuc na veľkoplošnú výrobu [9].



Obrázok 3.4: Schéma PVDF vytvárajúceho nanotrubice v matrici a SEM fotografia matrice a polymérnych PVDF nanotrubíc bez matrice [21].

3.2 Kompozity

Materiály na zvýšenie obsahu β fázy v PVDF polymére je možno kategorizovať do troch skupín, a to piezoelektrické, vodivé a nevodivé výplne. Takisto ako pri výrobe keramických piezoelektrických materiálov aj pri výrobe kompozitov sú preferované bezolovnaté keramické výplne. Piezoelektrické vlastnosti kompozitu významne ovplyvňuje nielen proces výroby, ale aj pomer PVDF a kompozitnej výplne.

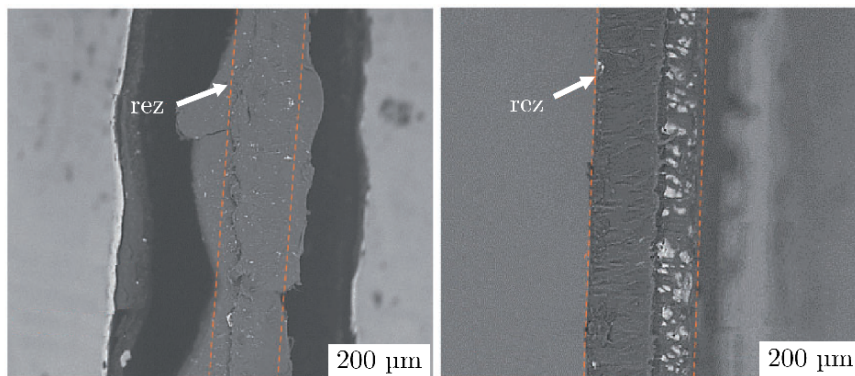
Tabuľka 3.1: Výplne PVDF zlepšujúce piezoelektrické vlastnosti [9].

Piezoelektrické výplne	Vodivé výplne	Nevodivé výplne
BaTi ₂ O ₅ , BaTiO ₃	grafén	nanoíl
ZnO, ZnTiO ₃	uhlíkové nanotrubice	halloyzitové nanotrubice
PMN-PT	strieborné nanočastice	deoxyribonukleová kyselina

3.2.1 Titaničitán barnatý

Ako bolo zmienené v kapitole 2.2.1 titaničitán barnatý (BaTiO_3 , BTO) je keramický piezoelektrický materiál. Zároveň je netoxický a disponuje lepšími piezoelektrickými vlastnosťami než PVDF. Kompozit spája výhody oboch materiálov, no najväčším problémom pri výrobe je zaistiť rovnomerné rozloženie BTO v PVDF.

Najjednoduchšími výrobnými technológiami fóliového kompozitu sú odlievanie roztoku alebo odstredivé nanášanie vrstvy, kde sú oba materiály zmiešané v tekutom stave. Pri týchto procesoch dochádza k zhlukovaniu BTO a pretože BTO má vyššiu hustotu než PVDF, dochádza k jeho nerovnomernému rozloženiu v PVDF. Po výrobe kompozitnej fólie môže byť obsah β fázy zvýšený následným polarizovaním. Existujú ďalšie výrobné technológie ako napríklad 3D tlač z kompozitnej fólie [22], ktorými je možné dosiahnuť rovnomernejšie rozloženie BTO v PVDF. Polarizácia kompozitu, ktorý má viac homogénnu štruktúru potom vykazuje oveľa lepšie výsledky zvýšenia obsahu β fázy. Na obrázku 3.5 sú SEM fotografie prierehového rezu liatou kompozitnou fóliou (vpravo) a prierehového rezu liatej fólie ďalej spracovanej vytláčaním vlákna a 3D tlačou (vľavo).

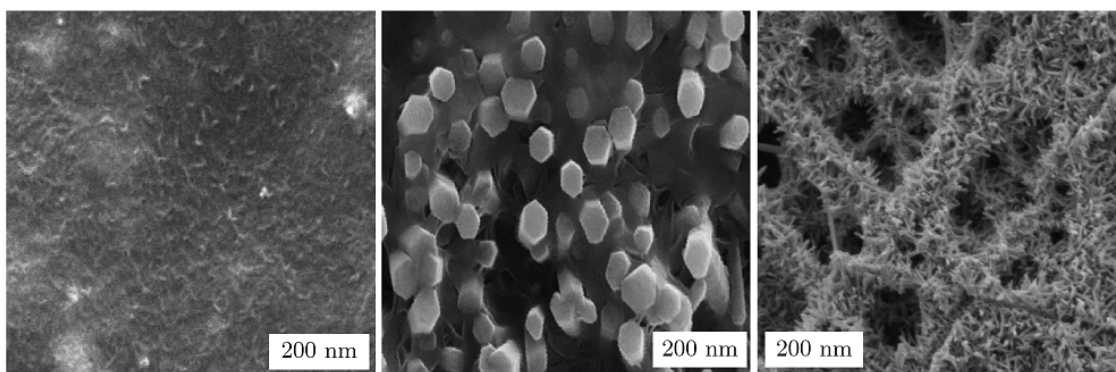


Obrázok 3.5: Rozloženie BTO v kompozite závislé na procese výroby [22].

3.2.2 Oxid zinočnatý

Do PVDF sa pri výrobe kompozitu pridáva oxid zinočnatý (ZnO) vo forme nanočastíc alebo nanotyčíc. Technológia je podobná ako u BTO, no napríklad Anand et al. [23] vyrobil kompozitné fólie liatím PVDF roztoku na nanotyče a vertikálne usporiadané nanotyče ZnO . Kompozit s usporiadanými nanotyčami má niekoľkonásobne lepšiu odozvu v ohybe aj v krute. Na obrázku 3.6 vľavo je kompozit PVDF s neusporiadanými nanotyčami ZnO , v strede je kompozit PVDF s usporiadanými nanotyčami ZnO .

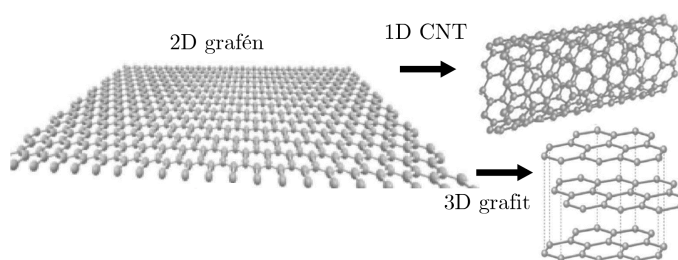
PVDF a ZnO sú biokompatibilné materiály a ich kompozit môže byť vyrobený hydrotermálnym rastom ZnO nanotyčíc na PVDF nanovláknach vyrobených pomocou elektrostátického zvlákňovania [24]. Na obrázku 3.6 vpravo je SEM fotografia kompozitu. Výhodou je nielen zvýšenie obsahu β fázy, ale aj zachovanie priedušnosti a ohybnosti nanovláken PVDF, vlastností veľmi vhodných pre nositeľnú elektroniku (angl. wearables) a monitorovanie zdravia.



Obrázok 3.6: Kompozity zložené z PVDF a ZnO [23, 24] .

3.2.3 Grafén

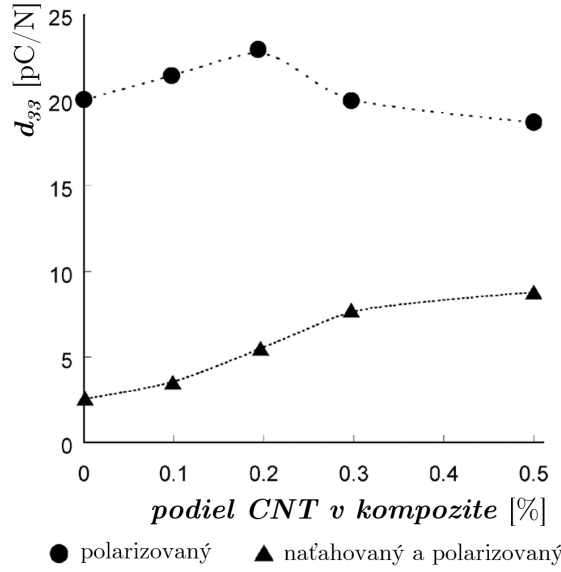
Grafén je 2D vrstva s hrúbkou jedného atómu uhlíka a šesťhrannou štruktúrou. Táto vrstva je stavebnou štruktúrou 3D grafitu, 1D uhlíkových nanotrubic a 0D fullerénu [25].



Obrázok 3.7: Grafén a ďalšie modifikácie uhlíka [25].

Fóliový kompozit sa pripravuje najmä odlieváním roztoku, nanovláknový kompozit elektrostatickým zvlákňovaním. Pridávaný grafén môže byť obohatený o ďalšie prvky, používané zlučniný sú grafénový oxid (GO), redukovaný grafénový oxid (RGO), redukovaný grafénový oxid s aditívom železa (Fe-RGO).

Najväčšou prednosťou uhlíkových nanotrubic (CNT) a viacstenných uhlíkových nanotrubic (MWCNT) je elektrická vodivosť, ktorou zlepšujú prenos náboja v miestach kontaktu s elektródami a tým výstupný výkon. Viacstenné uhlíkové nanotrúbice pôsobia pri kryštalizácii z roztoku ako nukleačné činidlá meniace α fázu na β fázu. Výrobné technológie sú podobné ako u grafénových kompozitov, po kryštalizácii kompozitovej zmesi v správnom pomere sa využíva lisovanie za tepla [26, 27, 28], následné natahovanie a polarizácia, čím vznikne homogénny materiál s výrazne vyšším obsahom β fázy. Obsah β fázy však závisí aj na hmotnostnom pomere nanotrubic a PVDF, čo potvrdzuje obrázok 3.8. Po polarizácii a natahovaní kompozitnej fólie je piezoelektrická nábojová konštanta výrazne väčšia než len po samotnej polarizácii, maximálna je podľa [26] práve pri podiele 0.2 % hmotnosti kompozitu. Pri vyššom podiele nanotrubic v kompozite sa d_{33} znižuje.



Obrázok 3.8: Závislosť d_{33} na podiele nanotrubic v polarizovanom kompozite a v polarizovanom natiahnutom kompozite [26].

3.3 Vlastnosti

Pre popis priameho i inverzného piezoelektrického javu a s ním spojené správanie materiálu sú využívané štyri konštitutívne vzťahy [29]. Uvedené vzťahy (3.1), (3.2) uvažujú konštantné napätie a elektrické pole. Ďalšie vzťahy uvažujú konštantné pretvorenie a elektrické pole, konštantné napätie a hustotu elektrického náboja, konštantné pretvorenie a hustotu elektrického náboja.

$$\mathbf{S} = \mathbf{s}^E \mathbf{T} + \mathbf{d}' \mathbf{E} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{d} \mathbf{T} + \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{E} \quad (3.2)$$

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{21}^E & s_{22}^E & s_{23}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{31}^E & s_{32}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{12}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{12}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{12}^E = 2(s_{11}^E - s_{12}^E) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{24} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22}^T & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

kde

- \mathbf{D} matica hustoty elektrického náboja
- \mathbf{E} matica intenzity elektrického poľa
- $\boldsymbol{\varepsilon}^T$ matica permitivity pri konštantnom napätí
- \mathbf{s}^E matica elastickej poddajnosti pri konštantnej intenzite elektrického poľa
- \mathbf{S} matica mechanického pretvorenia
- \mathbf{T} matica mechanického napätia
- \mathbf{d} matica piezoelektrických nábojových konštánt

3.3.1 Permittivita

Permittivita, tiež označovaná ako dielektrická konštanta, určuje zmenu dielektrika pri pôsobení elektrického poľa. Hodnota permitivity je závislá na smere, označuje sa ε_{ij} , kde i značí smer elektrickej indukcie a j určuje smer elektrického poľa. Hodnoty na diagonále matice sú absolútne a tvorí ich súčin permitivity vákua $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ [F/m] a relatívnej permitivity materiálu ε_r [-] [30, 31]. Mimodiagonálne prvky sú nulové.

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T = \varepsilon_0 \boldsymbol{\varepsilon}_r \quad (3.5)$$

3.3.2 Elastická poddajnosť

Elasticita izotrópných materiálov je definovaná pomocou modulu pružnosti v ťahu, v šmyku a Poissonovho čísla. Piezoelektrické materiály sú však anizotrópne a preto sa modul pružnosti v ťahu E_{ij} respektíve Y_{ij} [Pa] v zahraničnej literatúre (z Young's modulus) určuje pre dané smery [4]:

$$\mathbf{c} = \mathbf{Y} = \frac{\mathbf{T}}{\mathbf{S}} \quad (3.6)$$

kde \mathbf{c} [Pa] je matica tuhosti, \mathbf{T} je matica mechanického napätia a \mathbf{S} je matica mechanického pretvorenia. Elastická poddajnosť je prevrátená hodnota modulu pružnosti v ťahu, vo vzťahu (3.1) je \mathbf{s}^E [Pa⁻¹] elastická poddajnosť pri konštantnej intenzite elektrického poľa.

$$\mathbf{s} = \frac{1}{\mathbf{Y}} \quad (3.7)$$

3.3.3 Piezoelektrické konštanty

Existujú štyri piezoelektrické konštanty, ktoré sú vzájomne prepojené a všetky konštitutívne vzťahy sú vďaka tomu ekvivalentné [32].

Piezoelektrická napäťová konštanta

Piezoelektrická napäťová konštanta udáva pomer medzi veľkosťou intenzity generovaného elektrického poľa a pôsobiacim mechanickým napätím pre priamy piezoelektrický efekt a takisto pomer medzi veľkosťou vzniknutého pretvorenia v dôsledku pôsobenia elektrického poľa pre inverzný piezoelektrický efekt. Napäťová konštanta má označenie g_{ij} [VmN^{-1}] kde i označuje smer pôsobenia elektrického poľa a j určuje smer mechanického napätia či pretvorenia.

Piezoelektrická nábojová konštanta

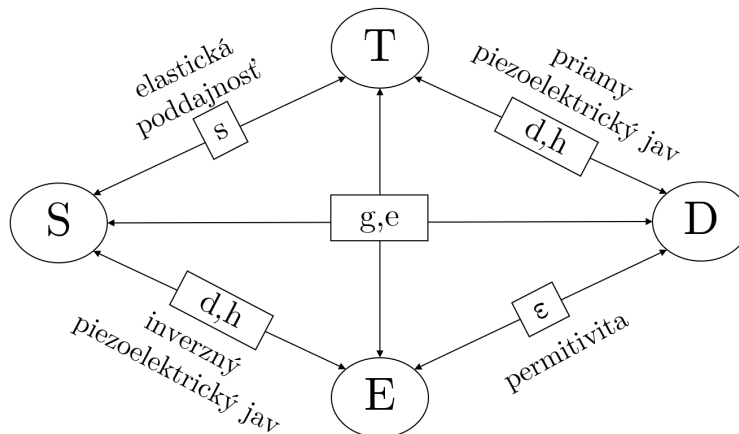
Piezoelektrická nábojová konštanta udáva pomer medzi veľkosťou generovaného elektrického náboja a mechanickým napätím pre priamy piezoelektrický jav a takisto pomer medzi veľkosťou vzniknutého pretvorenia v dôsledku pôsobenia elektrického náboja pre inverzný piezoelektrický jav. Nábojová konštanta má označenie d_{ij} [CN^{-1}], kde i označuje smer pôsobenia elektrického náboja a j označuje smer mechanického napätia či pretvorenia.

$$\mathbf{d} = \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{g} \quad (3.8)$$

Ďalšie piezoelektrické konštanty sú e_{ij} [Cm^{-1}] a h_{ij} [Vm^{-1}]. Pre priamy piezoelektrický jav udáva e_{ij} pomer medzi hustotou elektrického náboja a pôsobiacim pretvorením, h_{ij} udáva pomer medzi veľkosťou intenzity elektrického poľa a pôsobiacim pretvorením [33].

$$\mathbf{h} = \mathbf{c}^D \mathbf{g} \quad (3.9)$$

$$\mathbf{e} = \mathbf{c}^E \mathbf{d} \quad (3.10)$$



Obrázok 3.9: Prepojenie elektrických a mechanických veličín [32].

3.3.4 Elektromechanický k-faktor

Piezoelektrický (angl. coupling) faktor je bezrozmerná veličina, ktorá umožňuje porovnávať schopnosť rôznych piezoelektrických materiálov premieňať mechanickú energiu na elektrickú a opačne. Pre priamy piezoelektrický efekt je definovaný ako pomer akumulovanej elektrickej energie ku pôsobiacej mechanickej energii. Označuje sa k_{ij} [-] alebo [%], kde i vyjadruje smer elektrického poľa totožný so smerom polarizácie a j značí smer mechanickeho namáhania [14, 34].

$$k = \sqrt{\frac{d^2}{\epsilon^T s^E}} = \sqrt{ge} \quad (3.11)$$

3.4 Porovnanie vlastností

Uvedené vlastnosti sú spolu s hustotou, stratovým činiteľom alebo uhlom a maximálnou prevádzkovou teplotou základné parametre pre využitie v oblasti energy harvesting. V tabuľke 3.2 sa nachádza prehľad porovnávajúcich základných vlastností PVDF, ktoré uvádzajú rôzne zdroje, piezoelektrické konštanty sú v absolútnych hodnotách.

Tabuľka 3.2: Porovnanie mechanických, elektrických a piezoelektrických vlastností PVDF.

zdroj	[32]	[10]	[35]	[36]	[37]	[38]
mechanické vlastnosti						
hustota ρ [kgm ⁻³]	1780	1800	1700	1470	1760	-
Youngov modul Y [GPa]	2 až 4	2.5 až 3.2	2	4.18	0.9 až 2.5	1 až 3
elektrické vlastnosti						
relatívna permitivita ϵ_r [-]	6 až 13	12	12	13	7.6	11 až 12
stratový činiteľ $tg(\delta)$ [-] @1 kHz	0.02	0.018	-	-	0.015	0.018
tepelné vlastnosti						
max. operačná teplota T_{max} [°C]	80 až 100	90	-	-	90	135 až 150
piezoelektrické vlastnosti						
nábojová konštanta d_{31} [pC/N]	6 až 23	6 až 20	22	23.9	14	18 až 20
nábojová konštanta d_{33} [pC/N]	15 až 33	13 až 28	30	32.5	34	20
napäťová konštanta g_{31} [Vm/N]	0.06 až 0.22	-	0.216	-	0.21	0.15
napäťová konštanta g_{33} [Vm/N]	0.14 až 0.33	-	0.33	-	0.5	0.15
k -faktor [%]	10 až 15	12 až 27	14	14 až 19	10	-

Z porovnania je zrejmé, že vlastnosti PVDF sa pohybujú v rôznych medziach v závislosti na výrobnom procese. Pre návrh a praktické využitie je nutné dbať na tento fakt.

V tejto kapitole bol poskytnutý stručný prehľad o PVDF, jeho štruktúrach a niektorých kompozitoch. Pre ucelený obraz o potenciále využitia materiálov v oblasti energy harvesting materiálov zhŕňa tabuľka 3.3 vlastnosti zástupcov zo skupiny polymérov, keramiky a kompozitu. Z tabuľky vyplýva, že samotné PVDF je síce najpružnejší materiál,

no zároveň má najnižšiu schopnosť premeny, o čom vypovedá už na prvý pohľad k -faktor. Pridávanie kompozitných materiálov do PVDF alebo jeho kopolymérov je v súčasnosti najúčinnnejšou metódou pre získanie lepších piezoelektrických vlastností s ohľadom na pružnosť materiálu a reštrikciu používania olova.

Tabuľka 3.3: Porovnanie vlastností zástupcov zo skupín piezoelektrických materiálov.

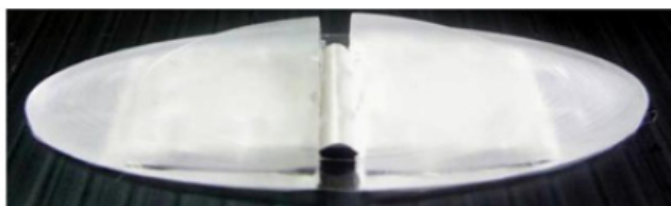
zdroj	[37]	[39]	[40, 41, 42]	[43, 44]	[10, 45]
skupina materiálu	polymér	kopolymér	keramika	keramika	kompozit
materiál	PVDF	PVDF-TrFe 70/30	BaTiO ₃	PZT-5A	MFC
mechanické vlastnosti					
hustota ρ [kgm ⁻³]	1760	1820	5800	7700	7500
Youngov modul Y [GPa]	0.9 až 2.5	3 až 5	67	63	30
elektrické vlastnosti					
relatívna permitivita ε_r [-]	7.6	8	1680	1600	850
stratový činiteľ $tg(\delta)$ [-] @1 kHz	0.015	0.015	-	0.02	-
tepelné vlastnosti					
max. operačná teplota T_{max} [°C]	90	115	120	170	80
piezoelektrické vlastnosti					
nábojová konštanta d_{31} [pCN ⁻¹]	14	11	79	190	170
nábojová konštanta d_{33} [pCN ⁻¹]	34	38	190	350	374
napäťová konštanta g_{31} [VmN ⁻¹]	0.21	0.16	4.7	13.7	-
napäťová konštanta g_{33} [VmN ⁻¹]	0.5	0.54	12.6	16.6	-
k -faktor [%]	10	25 až 29	50	40	53

4 Snímanie pomocou energy harvestingu

Oblasť využitia PVDF štruktúr je celá rada. Odborné publikácie sa zameriavajú najmä na získavanie energie z vibrácií stavebných diel, dopravných prostriedkov a z ľudskej činnosti. Citlivosť PVDF materiálu umožňuje využitie v širokom frekvenčnom rozsahu, avšak množstvo získanej energie je malé. Aj napriek tomu, že sa zariadenia z PVDF nazývajú generátory, v skutočnosti sa vo väčšine prípadov získaná energia neakumuluje. Štruktúry PVDF sú preto využívané na vysielanie signálu, z ktorého je možná detekcia náhlejšej poruchy či kontinuálne monitorovanie stavu, teda dynamických dejov. Pre meranie statických síl sa musí využívať kombinácia s iným typom snímača.

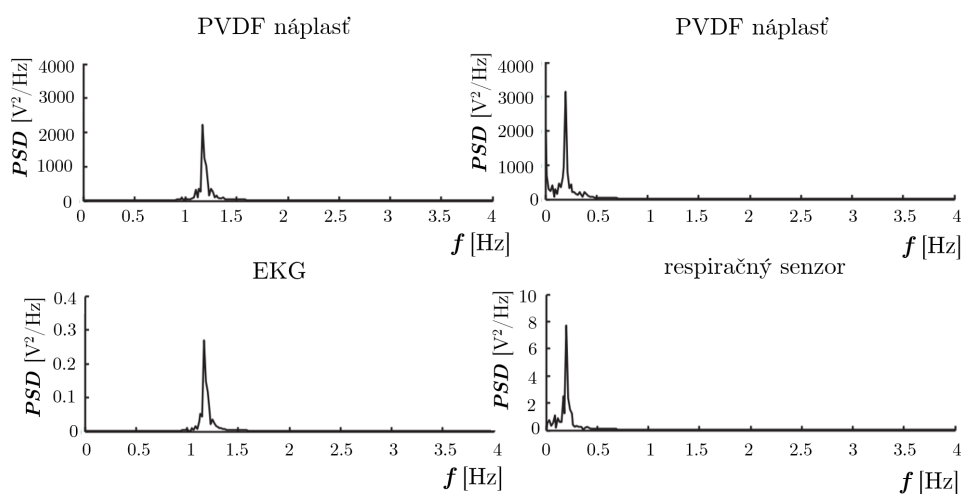
4.1 Monitorovanie zdravia

Nízka hmotnosť, flexibilita, rýchla odozva a vysoká citlivosť sú výhodami predurčujúcimi PVDF pre monitorovanie funkcií ľudského tela, a to srdečného tepu a dýchania. Chiu et al. [46] vyvinul zariadenie na monitorovanie tepu a dýchania - senzorickú náplast tvorenú PVDF fóliou ohnutou v prostrednej časti, PDMS krycou vrstvou a Mylarovou vrstvou vo funkcii izolátora od vlhkosti na tele.



Obrázok 4.1: Senzorická náplast. Vrstvy zhora: PDMS, PVDF, Mylar [46].

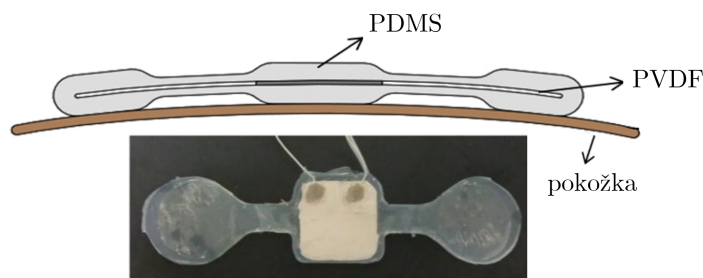
Z meraného signálu je možné so znalosťou frekvenčných rozsahov jednotlivých životných funkcií pomocou filtra separovať srdečný tep a dýchaciu frekvenciu.



Obrázok 4.2: Porovnanie srdečnej a dýchacej frekvencie [46].

Priemerná srdečná a dýchacia frekvencia, je žiadaným výsledkom senzora a preto boli signály prevedené na výkonovú spektrálnu hustotu Welchovou metódou. Výsledky korešpondovali s frekvenciou maxima výkonovej spektrálnej hustoty z komerčných senzorov.

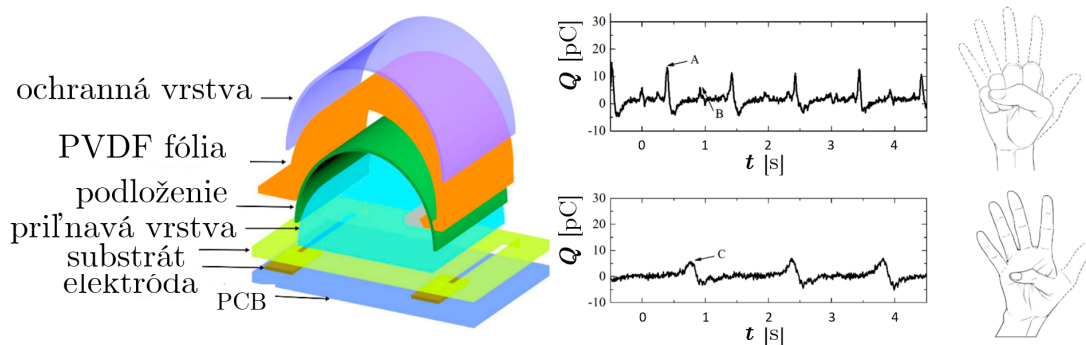
Predošlý senzor bol navrhnutý pre statické podmienky, tzn. sedenie. Pre snímanie počas dynamického deja ako je napríklad chôdza bol Leiom et al. [47] upravený dizajn tohoto senzora vid' obrázok 4.3 tak, že PVDF fólia bola umiestnená do vnútra PDMS, čím sa zabránilo rušivému kmitaniu za cenu nižšej citlivosti senzora. Oproti predchádzajúcemu snímaču tak vznikol nižší SNR (signal-to-noise ratio) čo vo všeobecnosti zťažuje analýzu signálu.



Obrázok 4.3: Vylepšenie senzora pre dynamický pohyb [47].

4.2 Snímanie pohybu ľudského tela

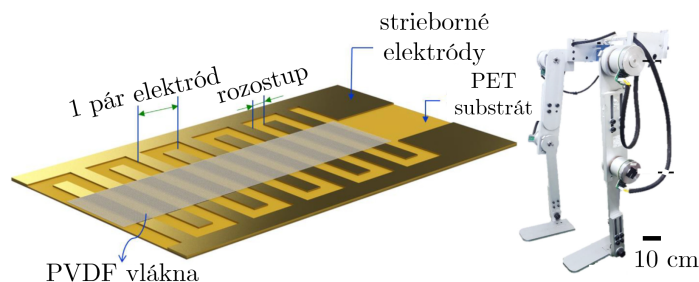
Autori článku [48] využili PVDF fóliu na detekciu pohybov zápästia, z čoho boli analyzované gestá ruky. Senzor bol zložený z niekoľkých vrstiev vid' obrázok 4.4 tak, aby bola fólia v zakrivenom tvare, vďaka čomu bol senzor citlivejší. Elektronika snímača bola zakomponovaná do poslednej vrstvy - PCB so zosilňovačom a dolnopriepustným filtrom. Pri tejto konštrukcii snímača dochádza pri vykonávaní gest ruky k pretvoreniu PVDF v móde 31, čo na výstupe generuje tvar signálu závislý na danom geste.



Obrázok 4.4: Štruktúra snímača (vľavo) a detekcia pohybu z výstupu snímača (vpravo) [48].

Pan et al. [49] využil mikrovlákná PVDF vyrobené metódou elektrostatického zvlákňovania NFES na výrobu MMG senzora snímajúceho pretvorenie na stehennom svalu.

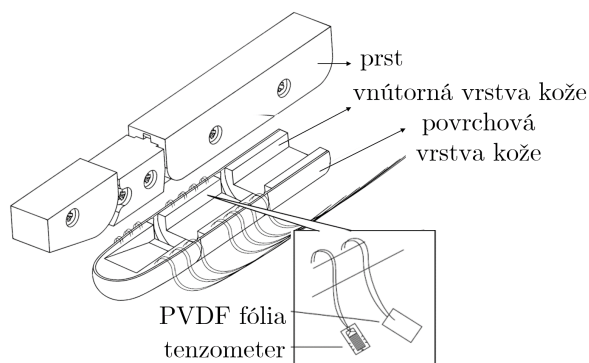
Výstupný napäťový signál riadil spínanie motorov rehabilitačného prístroja pre dolné končatiny. Vyrobené mikrovlákná boli dodatočne polarizované a spojené s PET fóliou, na ktorej boli strieborné elektródy vyrobené pomocou sieťotlače. Meranie výstupu senzora s rôznymi rozstupmi elektród ukázalo, že vyššie napätie je pri menšom rozstupe elektród. Elektroniku senzora tvoril zosilňovač, filtre a procesor, z ktorého výstupný signál mal SNR približne 25, zatiaľ čo SNR z komerčného EMG senzora bol rovný približne 4.



Obrázok 4.5: Schéma MMG senzora z PVDF mikrovláken a rehabilitačný prístroj [49].

4.2.1 Snímanie dotyku

Vďaka vysokej citlivosti PVDF sú štruktúry atraktívne pre využitie v robotických rukách ale aj v bionickej pokožke. Ďalšie uplatnenie nachádzajú snímače dotyku z PVDF v medicíne, presnejšie pri miniinvazívnych operáciách. U snímačov dotyku sa predpokladá ako detegovanie normálovej, tak šmykovej sily napríklad pri uchopovaní predmetov. Keďže PVDF je vhodný na snímanie dynamického deja, sníma sa ním šmyková sila, zatiaľ čo na meranie statickej tlakovej sily sa väčšinou využívajú tenzometre [50, 51, 52]. Ukážka realizácie robotického končeka prsta s využitím PVDF fólie je na obrázku 4.6.

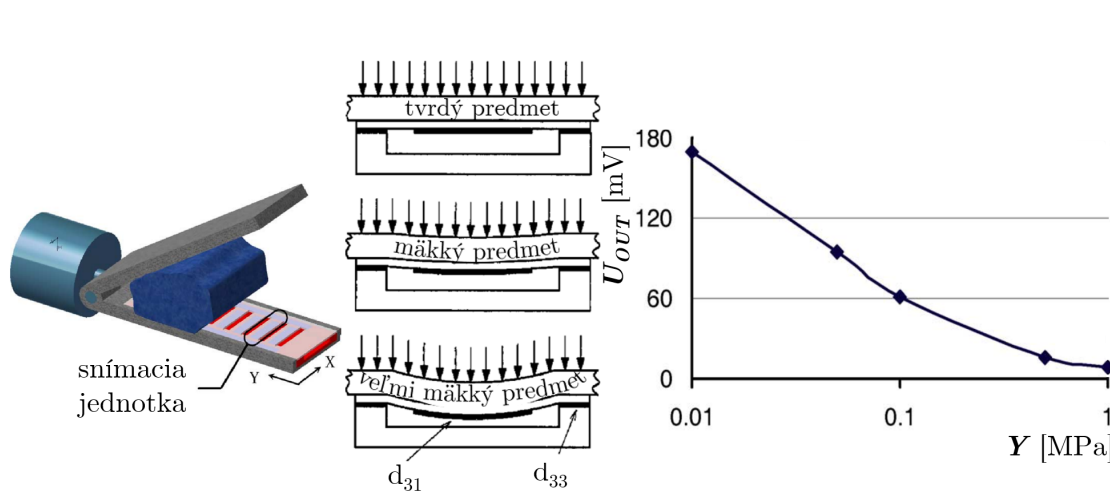


Obrázok 4.6: Štruktúra robotického prsta snímajúceho tlak a šmyk [50].

Väčšina rán, ktoré vzniknú behom operácie pacienta, je spôsobených umožnením prístupu lekára k operovanému miestu. Miniinvazívne operácie sú preto veľmi žiadané, pretože zaručujú oveľa kratší čas zotavenia. Na citlivosť snímača sú kladené vysoké nároky, pretože je potrebné rozoznať typ tkaniva a prípadné abnormality na ňom.

Sokhanvar et al. [53] vytvoril z PVDF fólií snímacie prvky pre endoskopické uchopovacie rameno. Na obrázku 4.7 je dizajn ramena a priečny rez jednou snímacou jednotkou zobrazujúci umiestnenie PVDF fólií. Fólie na krajných častiach v mieste podpory snímajú

tlakovú silu v móde 33 a fólia na nosníku uprostred sníma v móde 31, čím je možné zistiť pružnosť uchopeného tkaniva. S narastajúcim modulom pružnosti predmetu výstupné napätie na prostrednom snímači klesá.



Obrázok 4.7: Návrh endoskopického ramena a detekcia uchopeného objektu [53].

4.3 Vibrodiagnostika

Ďalšou širokou oblasťou využitia PVDF štruktúr je monitorovanie stavu. Úlohou systému je zistiť, lokalizovať a identifikovať poškodenia v štruktúre počas jej životnosti. Jedná sa o rôzne stavby, napríklad mosty pre cestné komunikácie či pre železničnú dopravu, stroje a letecké konštrukcie. Výhoda PVDF je snímanie v reálnom čase, ak je prítomný zdroj vibrácií. V porovnaní s plánovanými revíziami je k dispozícii veľké množstvo dát, čím je možné poruchu včas zachytiť a predísť prípadnej katastrofe. Veľkou výhodou snímania pomocou PVDF je, že ide o nedeštruktívny spôsob.

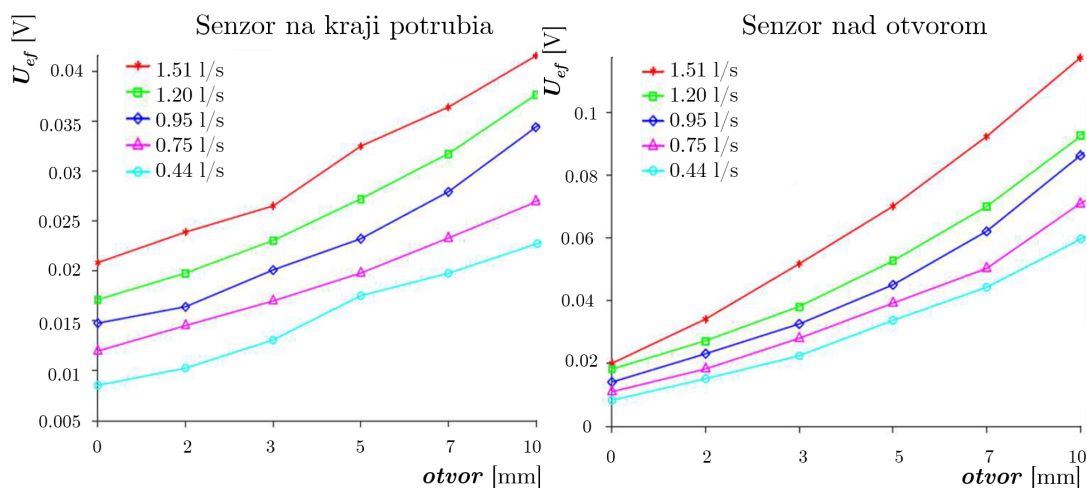
4.3.1 Potrubie

V množstve tlakových systémov prepravujúcich tekutiny dochádza k úniku plynu či kvapaliny z diery v potrubí či z chybného spoja jednotlivých potrubí. Senzory na monitorovanie tlakových systémov merajú na základe rôznych fyzikálnych princípov, najčastejšie sa delia podľa toho, či merajú veličinu na povrchu (termokamery, senzory pary, akustické čidlá či optické vlákna) alebo vnútri (prietokomer, tlakový senzor) potrubia.

Pri uvažovaní turbulentného prúdenia kvapaliny potrubím vznikajú víry. Molekuly kvapaliny vo víre prechádzajú z miesta vyššej kinetickej energie do miesta nižšej kinetickej energie k okoliu steny potrubia, kinetická energia kvapaliny sa premení na teplo a potenciálnu energiu vo forme tlaku [54]. Zmeny tlaku spôsobujú radiálny posuv steny trubky, čo sa prejaví ako vibrácie. So zmenou v potrubí, ako je napríklad diera či zlý spoj, sa vibrácie potrubia zväčšujú.

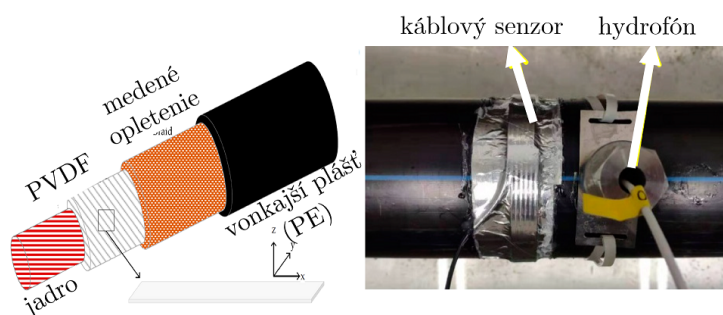
Autori článku [54] snímali vibrácie vodovodného potrubia pomocou PVDF fólií so striebornými elektródami. V experimentálnej sústave boli hlavnými komponentmi vymeniteľná testovacia trubka z galvanizovanej ocele, odstredivé čerpadlo a tri PVDF snímače: na kra-

joch testovacej trubice a nad miestom poruchy. Z testov prevedených pri rôznych prietokoch a pri rôznych veľkostiach diery v testovacej trubici sa potvrdilo, že čím je senzor bližšie k miestu poruchy, čím je diera v potrubí väčšia a takisto čím väčší je prietok, tým väčšie sú vibrácie a napäťový výstup snímačov viď obrázok 4.8. V grafoch konfiguruje efektívna hodnota napätia ako reprezentatívny ukazovateľ výstupného napäťového signálu pre daný stav poruchy a prietok. Na výstupnom napätí zobrazenom vo frekvenčnej oblasti sa neprejavila žiadna významná frekvencia, no signál z potrubia s väčšou poruchou mal väčšiu amplitúdu výstupného napätia aj v tejto oblasti.



Obrázok 4.8: Závislosť napätia na veľkosti diery a prietoku dvoch snímačov [54].

Alternatívnym riešením ku harvesteru z PVDF fólie na povrchu potrubia môže byť káblový PVDF harvester navinutý na potrubí, čo zrealizoval Sun et al. [55]. Výhodou je, že kábel je tieneny, môže sa nachádzať v elektromagnetickom poli bez rušivých vplyvov a takisto je vodotesný. Meranie bolo uskutočnené na plastovej PE trubici podporenej vo vzduchu a tiež ponorenej vo vode s rôznym počtom závitov PVDF kábla. Pre meranie v oboch prostrediach je nesmierne dôležité zaručiť dobrú prílnavosť káblov k povrchu potrubia, čo môže byť komplikované.

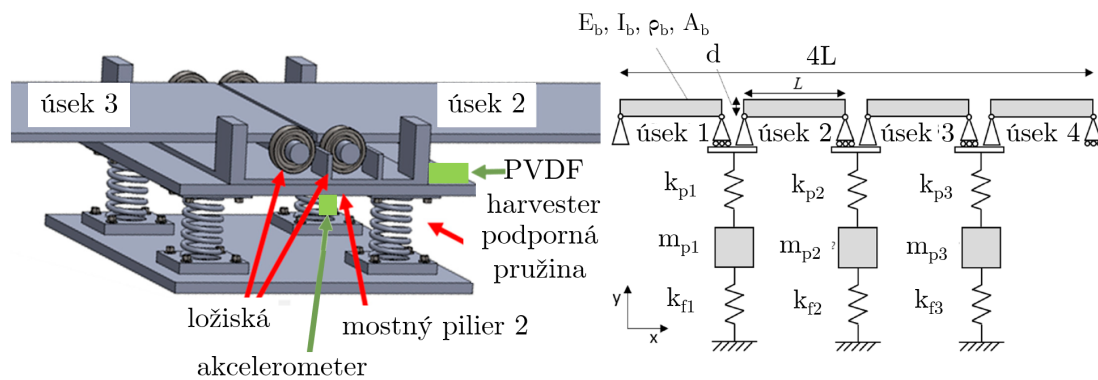


Obrázok 4.9: Štruktúra PVDF kábla a aplikácia na potrubie pod vodou [55].

4.3.2 Most

U mostov sú rizikami korózia, strata predpätia, pokles základov, zemetrasenie, neoprávnené preťažovanie, zlá kvalita stavebného materiálu a ďalšie. Častou príčinou zrútenia mostov býva tiež ubúdanie zeminy v oblasti uloženia mostných pilierov mostov v stálych či občasných vodných tokoch. Odhaľovaním pilierov sa znižuje tuhosť mosta a zo snímania vibrácií je možné zistiť zmenu vlastných frekvencií mosta, z ktorých sa dá spätne zistiť hĺbka vzniknutého koryta.

Fitzgerald et al. [56] použil laboratórny model trojpilierového železničného mosta, kde na prostredný pilier umiestnil energy harvester z PVDF fólie typu nosník s hmotou. Meranie prebiehalo súčasne s akcelometrom pre porovnanie výsledkov. Po prejazde vozidla boli generované napäťové signály prevedené do frekvenčnej oblasti a pomocou výkonovej spektrálnej hustoty boli stanovené prvé dve vlastné frekvencie.



Obrázok 4.10: Štruktúra hornej časti piliera, umiestnenie senzorov a schéma numerického modelu [56].

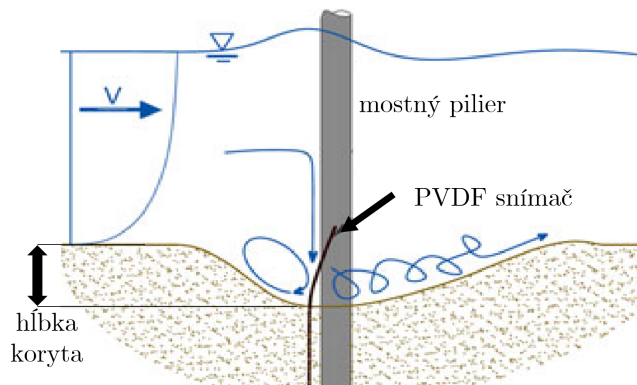
Tabuľka 4.1 porovnáva vlastné frekvencie získané z dát PVDF snímača z jedného merania, z priemeru desiatich meraní a z akcelometra pre tri situácie: neporušené uloženie piliera, koryto v okolí piliera vo štvrtinovej a v polovičnej hĺbke uloženia piliera. S narastajúcou hĺbkou koryta okolo piliera vlastné frekvencie mosta klesajú. Pokles frekvencií bol zaznamenaný aj pri koryte na vedľajšom pilieri.

Tabuľka 4.1: Hodnoty vlastných frekvencií vychádzajúce z výkonovej spektrálnej hustoty napäťového signálu.

hĺbka koryta	0		1/4 piliera		1/2 piliera	
	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]
akcelometer	9.67	11.82	9.08	11.43	8.20	11.23
PVDF 1 meranie	9.77	11.91	8.98	11.52	8.20	11.23
PVDF 10 meraní	9.77	11.82	9.08	11.43	8.20	11.13

Azhari a Loh [57] na základe rovnakého princípu, zmeny vlastnej frekvencie, vytvorili vodeodolné harvestery z PVDF fólie zaliatej v PDMS vo forme tyčiniek. Tie umiestnili

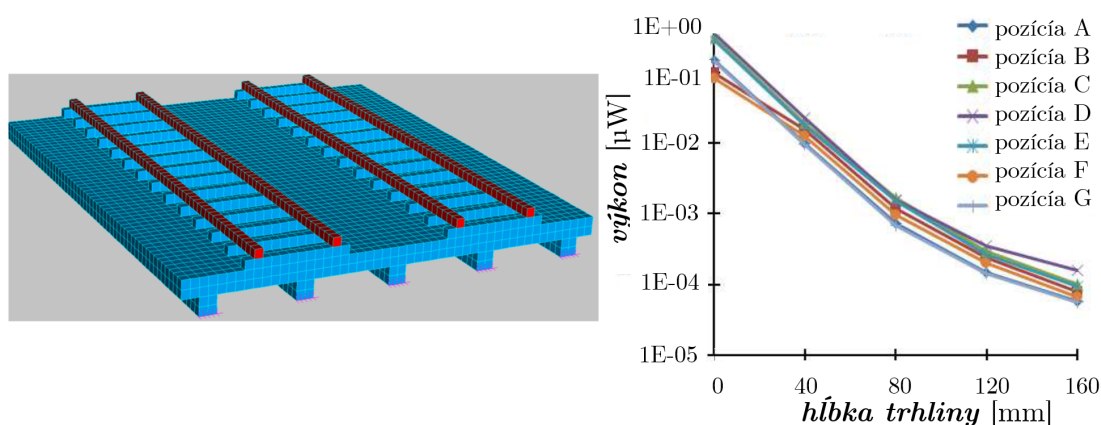
do niekoľkých bodov v okolí experimentálneho mostného piliera uloženého v piesku do dostatočnej hĺbky.



Obrázok 4.11: Schéma uloženia snímačov. So zmenou hĺbky koryta sa mení dĺžka snímača [57].

V laboratórnych podmienkach bol vytvorený vodný tok vytvárajúci koryto v oblasti piliera a z napäťového výstupu boli v určených časových úsekoch pomocou FFT vytvorené amplitúdovo frekvenčné charakteristiky určujúce s časom meniacu sa prvú vlastnú frekvenciu tyčínok. Na základe modelu bola vytvorená kalibračná krivka popisujúca závislosť vlastnej frekvencie na dĺžke tyčinky. Hodnoty vlastných frekvencií získané z merania boli pomocou kalibračnej krivky prevedené na dĺžku tyčinky úmernú hĺbke koryta okolo laboratórneho piliera.

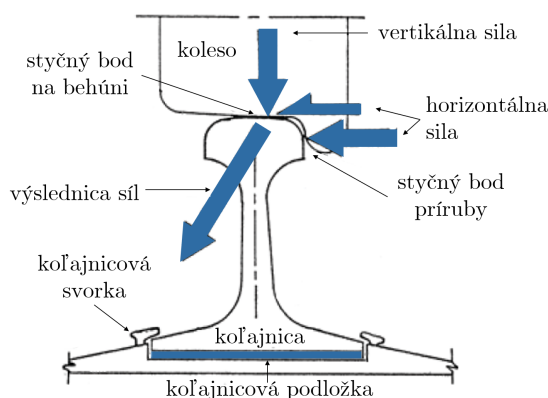
Monitorovanie štruktúrneho stavu železničného mosta s trhlinami na základe parametrov laboratórne vyrobeného harvesteru z PVDF fólie snímajúceho v móde 31 simuloval Cahill et al. [58]. Na vybraných nosníkoch vytvoril trhliny konštantnej šírky rôznych hĺbok. Vlak bol simulovaný ako impulz sily pohybujúci sa po koľajniciach v čase. Touto simuláciou sa preukázalo, že energia získaná zo senzora v oblasti poškodenia je menšia než energia z nepoškodeného miesta, čo umožňuje lokalizáciu miesta trhliny. Určenie rozsahu poškodenia by bolo v praxi možné pomocou kalibrácie senzora za znalosti faktu, že získaná energia sa znižuje s narastajúcou hĺbkou trhliny. Na obrázku 4.3.2 vpravo sú výkony získané z harvesterov na siedmich pozíciách jedného nosníka mostu. Trhlina sa nachádza v prostrednom bode D.



Obrázok 4.12: Model mosta a pokles výkonu v závislosti na rozsahu poškodenia [58].

4.3.3 Koľajnice

Veľmi často vyskytujúcim sa problémom vlakov vedúcim v krajnom prípade k vykoľajeniu býva nerovnosť kolies. Separátne premeriavanie kolies je veľmi náročné. V praxi sa využíva analýza vertikálnej zložky kontaktnej sily medzi vlakom a koľajnicami. Tvar deformovaného kola môže byť podľa harmonického rádu excentrický (rád 1), oválny (rád 2), triangulárny (rád 3) až polygonický (rád n) [59]. So zväčšujúcou sa deformáciou kolies, harmonickým rádom a rýchlosťou vlaku sa zväčšuje aj kontaktná sila.

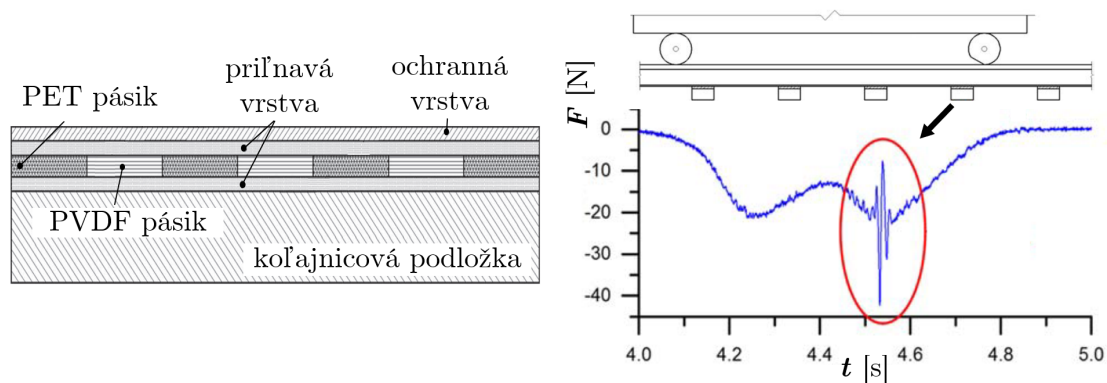


Obrázok 4.13: Sily pri kontakte kola s koľajnicou [60].

Autori článkov [59, 61] využili senzor z PVDF fólie umiestnený na stojine koľajnice, kde sú zvyčajne aplikované tenzometre. Oproti nim má však PVDF výhodu väčšieho frekvenčného a dynamického rozsahu a odolnosti voči elektromagnetickému rušeniu. Zo snímania v móde 31 sa ukázalo, že pretvorenie senzora je úmerné vertikálnej kontaktnej sile medzi koľajnicou a kolesom.

V [62] bol navrhnutý a na koľajnici v teréne otestovaný snímač z PVDF fólie. Tento senzor na rozdiel od predchádzajúcich sníma tlak, teda v móde 33, na koľajnicovej podložke z HDPE. Senzor tvoria striedajúce sa pásiky PVDF s pásikmi PET, ktoré slúžia na presun bočných síl, a niekoľko ďalších vrstiev. V laboratórnych podmienkach bola vytvorená kalibračná krivka určujúca vzťah medzi výstupným napätím zo senzora a vertikálnou

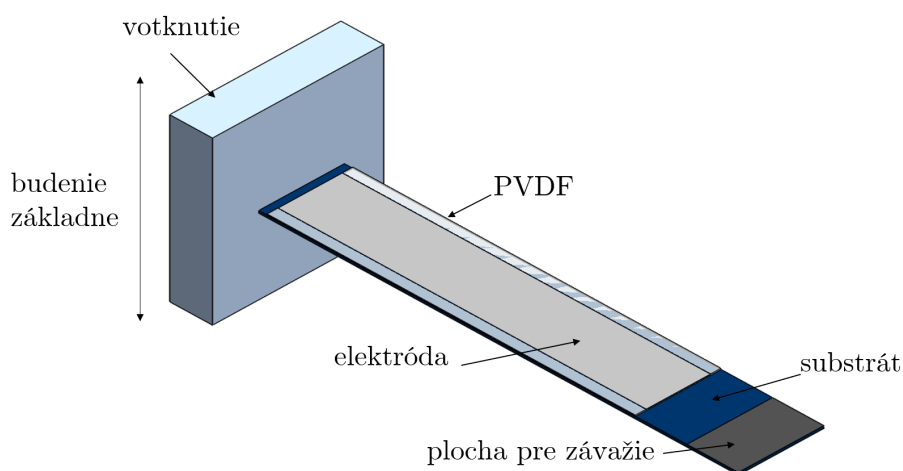
tlakovou silou od zatažujúceho stroja. Po umiestnení pod ozajstnú koľajnicu bolo zvýšenie kontaktnej sily s defektom kolesa vagóna vlaku preukázané.



Obrázok 4.14: Rez snímačom a detekcia poškodeného kolesa vagóna [62].

5 Modely jednomorfného piezoelektrického nosníka

Ako bolo v teoretickej časti popísané, pre testovanie PVDF fólie je vhodné zaťažovanie v ohybovom móde, teda v móde 31. Hlavnou časťou testovacieho prípravku bol tak pre analýzu vlastností zvolený jednostranne votknutý jednomorfný piezoelektrický nosník s variabilným závažím na voľnom konci. K popisu vlastností piezoelektrického nosníka budeného kinematicky sú v tejto kapitole popísané princípy zostavenia troch modelov.



Obrázok 5.1: Piezoelektrický nosník ako modelovaná súčasť testovacieho prípravku.

Zostava na obrázku sa skladá (zdola) zo substrátu vyrobeného z ocele, z PVDF fólie, elektródy zo striebornej pasty. Tmavošedá časť substrátu na obrázku v modeloch vystupuje ako závažie. Ocelový nosník, na ktorý je PVDF fólia pripevnená, slúži zároveň ako jedna elektróda. PVDF vrstva spolu s hornou elektródou je posunutá smerom od votknutia a v tomto mieste odsadenia sa na elektródu pripája vedenie.

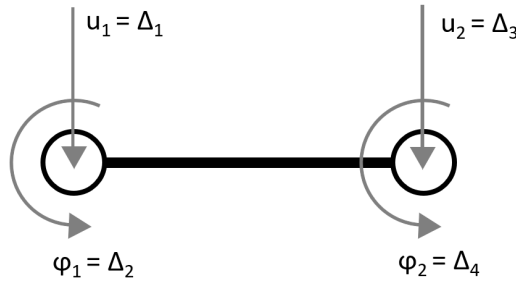
5.1 Model s N stupňami voľnosti - NDOF

Zostavenie elektromechanických rovníc nosníka s piezoelektrickou vrstvou vychádza z Hamiltonovho princípu a pre reprezentáciu vlastností jednotlivých elementov je použitá MKP formulácia Euler-Bernoulliho dvojdimenzionálneho nosníkového prvku.

5.1.1 Euler-Bernoulliho teória

Euler-Bernoulliho teória, takisto nazývaná klasická nosníková teória, je veľmi často používaná pre odvodenie statického ale i dynamického priebyhu a jeho derivácií. Pre využitie tejto teórie musí nosník spĺňať nasledujúce základné predpoklady.

- Deformácie nosníka sú malé.
- Nosník je dostatočne štíhly - zanedbáva sa šmykové napätie.
- Rovina prierezu je vždy kolmá na neutrálnu os.
- Neutrálna os svoju dĺžku pri deformácii nemení.
- Vzťahy platia iba v lineárnej teórii pružnosti.



Obrázok 5.2: Stupne voľnosti 2D elementu nosníka pre ohyb.

Pri ohybovom namáhaní sa pre každý uzol elementu uvažujú dva stupne voľnosti, a to posuv a natočenie, viď obrázok 5.2. Tieto stupne voľnosti tvoria vektor uzlových posuvov elementu

$$\mathbf{u}_e = [u_1 \quad \varphi_1 \quad u_2 \quad \varphi_2]^T = [\Delta_1 \quad \Delta_2 \quad \Delta_3 \quad \Delta_4]^T. \quad (5.1)$$

Nosník vibrujúci priečne je možné modelovať ako sústavu s jedným stupňom voľnosti, avšak nájsť ekvivalentnú tuhosť a hmotnosť pre nosník výrazne meniaci svoje materiálové vlastnosti pozdĺž strednice je pre jeden element náročné. Piezoelektrický nosník sa preto rozdelí na N rovnako dlhých elementov, ktorých matice hmotnosti a tuhosti sa budú riadiť vzťahmi odvodenými pre ohyb nosníka pomocou Hermitových interpolačných polynómov [63]

$$\mathbf{m}_e = \frac{\rho_e A_e l_e}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22l_e & 54 & -13l_e \\ 22l_e & 4l_e^2 & 13l_e & -3l_e^2 \\ 54 & 13l_e & 156 & -22l_e \\ -13l_e & -3l_e^2 & -22l_e & 4l_e^2 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$\mathbf{k}_e = \frac{(EJ)_e}{l_e^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l_e & -12 & 6l_e \\ 6l_e & 4l_e^2 & -6l_e & 2l_e^2 \\ -12 & -6l_e & 12 & -6l_e \\ 6l_e & 2l_e^2 & -6l_e & 4l_e^2 \end{bmatrix}, \quad (5.3)$$

kde \mathbf{m}_e , \mathbf{k}_e sú matice hmotnosti a tuhosti elementu, ρ_e je hustota elementu, A_e je jednotková hmotnosť elementu, l_e je dĺžka elementu a $(EJ)_e$ je ohybová tuhosť elementu.

5.1.2 Hamiltonov princíp

Odvodzovanie vzťahov popisujúcich elektromechanické správanie piezoelektrického nosníka pre metódu končených prvkov sa prevádza prostredníctvom energií. Hamiltonov variačný princíp skúma pohyb telesa ako celku a hovorí, že pri pohybe telesa z počiatočnej do koncovej polohy skutočný pohyb nastáva po takej trajektórii, pre ktorú nadobúda akcia (presun závisiaci na trajektórii) najmenšiu hodnotu [64]

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(E_k - E_p + W_e + W_{ext})dt = 0, \quad (5.4)$$

kde E_k je kinetická energia, E_p je potenciálna energia, z ktorých je odvodená hmotnosť a tuhosť. W_e je elektrická energia pieza a W_{ext} je práca vykonaná externými silami. Jednotlivé energie a práce sú vyjadrené

$$E_k = \frac{1}{2} \int_V \rho \dot{\mathbf{u}}^T \dot{\mathbf{u}} dV \quad (5.5)$$

$$E_p = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{S}^T \mathbf{T} dV \quad (5.6)$$

$$W_e = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{E}^T \mathbf{D} dV \quad (5.7)$$

$$W_{ext} = -\delta \mathbf{u} \mathbf{f} + \delta \mathbf{v} \mathbf{Q}, \quad (5.8)$$

kde ρ je hustota materiálu, $\mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}}$ sú vektor posuvu a jeho derivácia vo fyzikálnych súradniciach, V je objem, $\mathbf{S}, \mathbf{T}, \mathbf{E}, \mathbf{D}$ sú v poradí matice pretvorenia, mechanického napätia, intenzity elektrického poľa a hustoty elektrického náboja, \mathbf{f} je vektor budiacej sily, \mathbf{v} je vektor elektrického napätia a \mathbf{Q} je vektor elektrického náboja.

5.1.3 Sústava vo fyzikálnych súradniciach

Použitím Hamiltonovho variačného princípu (5.4) pre jednotlivé energie (5.5 až 5.8) je možné piezoelektrický nosník popísať pomocou dvoch vzťahov. Prvý vzťah predstavuje elektromechanickú dynamickú rovnicu piezoelektrického nosníka a druhý vzťah je možno získať tiež z elektromechanickej analógie popísanej v kapitole 8.2.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) + \mathbf{\Theta}\mathbf{v}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (5.9)$$

$$\mathbf{C}_p \dot{\mathbf{v}}(t) + \frac{\mathbf{v}(t)}{R_z} = \mathbf{\Theta} \dot{\mathbf{u}}(t) \quad (5.10)$$

$\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$ sú v poradí globálna matica hmotnosti, globálna matica tlmenia, globálna matica tuhosti, $\mathbf{\Theta}$ je globálna matica elektromechanického člena premeny a \mathbf{C}_p je globálna matica kapacity, $\mathbf{f}(t)$ je vektor budiacej sily, R_z je odporová záťaž, $\mathbf{u}(t), \dot{\mathbf{u}}(t), \ddot{\mathbf{u}}(t)$ sú vektory posuvov vo fyzikálnych súradniciach a ich derivácie v čase, $\mathbf{v}(t), \dot{\mathbf{v}}(t)$ sú vektory napätia a jeho derivácie v čase.

Globálna matica hmotnosti sa skladá z matíc elementu hmotnosti (5.2) s hodnotami jednotkovej hmotnosti $A_e = bh$ a hustoty ρ prislúchajúcimi meniacemu sa úseku pozdĺž

střednice prutu a konstantnou délkou elementu. Závaží je modelované jako hmota distribuovaná na úseku, kde je závaží připevněné, prakticky je to úsek substrátu s hustotou odpovídající substrátu a závaží.

Ohybová tuhost elementu tuhosti sa pre úsek střednice, kde sa nachádza iba substrát, riadi vzťahom $EJ = Y_s J_s$, zatiaľ čo pre úsek, na ktorom sú oba materiály (substrát a piezo) je ohybová tuhost daná vzťahom pre klasickú laminátovú teóriu [65]

$$EJ_{sp} = D - \frac{B^2}{A} = b \left[\frac{1}{12} [Y_s(h_s^3 + 3h_s h_p^2) + Y_p(h_p^3 + 3h_p h_s^2)] - \frac{(0.5h_s h_p (Y_p - Y_s))^2}{Y_s h_s + Y_p h_p} \right]. \quad (5.11)$$

5.1.4 Okrajové podmienky

Nosník je jednostranne votknutý (zľava) a je nutné túto väzbu zohľadniť vo forme okrajových podmienok. Z globálnych matíc \mathbf{M} a \mathbf{K} sú z prvého uzla prvého elementu odobrané stupne voľnosti - posuv a natočenie v uzle.

5.1.5 Modálne vlastnosti

Zatiaľ čo u systémov s jedným stupňom voľnosti (SDOF) sa vlastná frekvencia určuje pomocou jednoduchého vzťahu $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ a vlastné tvary kmitu sa určujú dosadením koreňov charakteristickej rovnice

$$\cos(\lambda L) \cosh(\lambda L) + 1 = 0 \quad (5.12)$$

do tvarovej funkcie

$$\phi(x) = \cosh(\lambda x) - \cos(\lambda x) - \frac{\sinh(\lambda) - \sin(\lambda)}{\cosh(\lambda) + \cos(\lambda)} \sinh(\lambda x) - \sin(\lambda x), \quad (5.13)$$

u systému s N stupňami voľnosti je vlastných frekvencií a vlastných tvarov niekoľko, k ich riešeniu vedie problém vlastných hodnôt.

Vlastné frekvencie

Zovšeobecnený problém vlastných hodnôt vychádza z pohybovej rovnice pre voľné netlmené kmitanie [66].

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = 0 \quad (5.14)$$

Dosadením predpokladaného riešenia v tvare $\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}_0 e^{i\omega t}$ do vzťahu (5.14) dostane pohybová rovnica tvar

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\mathbf{u}_0 = 0. \quad (5.15)$$

Nutnou a postačujúcou podmienkou pre riešenie tejto rovnice je, že determinant jej ľavej strany musí byť nulový.

Vlastné tvary kmitov

Ku každej vlastnej frekvencii systému ω_i z rovnice (5.15) prísluší vlastný vektor \mathbf{u}_{0i} . Matica $(\mathbf{K} - \omega_i^2 \mathbf{M})$ je singulárna a dosadenie vlastnej frekvencie do vzťahu by viedlo k nekonečne mnoho riešeniam vektora \mathbf{u}_{0i} . Preto je možné určiť iba vzájomné pomery prvkov vlastného vektora \mathbf{u}_{0i} . Takto vytvorené vektory popisujú vlastný tvar kmitania $\phi_i(x)$, ktorým sústava voľne kmitá s uhlovou frekvenciou ω_i .

5.1.6 Redukcia z N na jeden stupeň voľnosti

So znalosťou vlastných frekvencií a vlastných tvarov je veľmi vhodné redukovať systém na jeden stupeň voľnosti, čím podstatne skráti dobu výpočtu. Keďže u piezoelektrického nosníka je žiadané kmitanie v prvom móde a okolo prvej vlastnej frekvencie, výsledný vzťah pohybovej rovnice bude zjednodušený pre prvý modálny tvar. Jedným zo spôsobov redukcie stupňov voľnosti je metóda superpozície modálnych tvarov. Redukcia vychádza z pohybovej rovnice

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{f}(t). \quad (5.16)$$

Transfomácia súradníc

Princíp redukcie spočíva v prevedení fyzikálnych súradníc výchylky nosníka do modálnych súradníc

$$\mathbf{u}_i = \sum_{i=1}^n \phi_i y_i, \quad (5.17)$$

kde \mathbf{u}_i je vektor fyzikálnych súradníc i -tého módu, ϕ_i je i -ty modálny tvar a y_i je modálna amplitúda i -tého módu. Rovnica (5.17) sa dosadí do (5.16) a vynásobí j -tým modálnym tvarom ϕ_j^T :

$$\phi_j^T \mathbf{M} \sum_{i=1}^n \phi_i \ddot{y}_i + \phi_j^T \mathbf{C} \sum_{i=1}^n \phi_i \dot{y}_i + \phi_j^T \mathbf{K} \sum_{i=1}^n \phi_i y_i = \phi_j^T \mathbf{f}. \quad (5.18)$$

Z podmienky ortogonalít (nezávislosti) vlastných modálnych tvarov na sebe je možné pre dva rôzne modálne tvary dokázať, že

$$\phi_j^T \mathbf{M} \phi_i = 0 \quad i \neq j \quad (5.19)$$

$$\phi_j^T \mathbf{K} \phi_i = 0 \quad i \neq j. \quad (5.20)$$

Normovanie vzhľadom k hmotnosti

Pre tvary vlastného kmitania sa môžu amplitudy zvoliť tak, aby platil jeden z uvedených vzťahov. Jedná sa o normovanie modálnej matice, ktoré môže byť vzhľadom k jednotke (5.21), k matici tuhosti (5.22) alebo k matici hmotnosti (5.23). V tomto modeli je volené najčastejšie používané normovanie, a to vzhľadom k matici hmotnosti.

$$\phi_i^T \phi_i = 1 \quad (5.21)$$

$$\phi_i^T \mathbf{K} \phi_i = 1 \quad (5.22)$$

$$\phi_i^T \mathbf{M} \phi_i = 1 \quad (5.23)$$

V prípade normovania vzhľadom k matici hmotnosti platia pre systém s jedným stupňom voľnosti pre prvý ohybový tvar tieto rovnosti

$$\phi_1^T \mathbf{C} \phi_1 = \mathbf{C} \phi_1^2 \quad (5.24)$$

$$\phi_1^T \mathbf{K} \phi_1 = \omega_1^2 \quad (5.25)$$

$$\mathbf{C} = 2\xi \mathbf{M} \sqrt{\frac{\mathbf{K}}{\mathbf{M}}} = 2\xi \mathbf{M} \omega_1, \quad (5.26)$$

kde ξ je pomerný útlm bližšie popísaný v (6.1.1).

Zohľadnením podmienok ortogonalit vlastných tvarov (5.19, 5.20) prechádza pohybová rovnica (5.18) pre prvý ohybový mód do tvaru

$$\phi_1^T \mathbf{M} \phi_1 \ddot{y} + \phi_1^T \mathbf{C} \phi_1 \dot{y} + \phi_1^T \mathbf{K} \phi_1 y = \phi_1^T \mathbf{f}. \quad (5.27)$$

Kmitanie nosníka

Vzťahy pre superpozíciu modálnych tvarov sa aplikujú na obe piezoelektrické rovnice (5.9, 5.10). Nosník je jednomorfný, preto sa globálna matica elektromechanického člena premeny Θ a globálna matica kapacity \mathbf{C}_p zjednodušia na konštantu prislúchajúcu jednej piezoelektrickej vrstve. Pre definíciu elektromechanického člena premeny je najprv nutné určiť polohu neutrálnej osi piezoelektrického nosníka. Podľa klasickej laminátovej teórie je neutrálna os vzdialená od geometrického stredu kompozitu [65]

$$z_n = \frac{B}{A} = \frac{0.5h_s h_p (Y_p - Y_s)}{Y_s h_s + Y_p h_p}, \quad (5.28)$$

kde Y je Youngov modul pružnosti, h je hrúbka, index p značí piezoelektrickú vrstvu a index s značí substrát. Člen elektromechanickej premeny v modálnych súradniciach závisí na piezoelektrickej konštante, rozmeroch elektródy a jej natočení. Podľa [68] je definovaná ako

$$\vartheta = -e_{31} b_e (z_{Tp} - z_n) \int_{x_1}^{x_2} \frac{d^2 \phi_1(x)}{dx^2} = -e_{31} b_e (z_{Tp} - z_n) \left. \frac{d\phi_1(x)}{dx} \right|_{x=x_1}^{x=x_2}, \quad (5.29)$$

kde e_{31} je piezoelektrická konštant, b_e je šírka elektródy, $(z_{Tp} - z_n)$ je vzdialenosť medzi geometrickým stredom piezoelektrickej vrstvy a neutrálnou osou kompozitu, x_1 a x_2 sú súradnice začiatku a konca elektródy smerom od votknutia, $\phi_1(x)$ je prvý modálny tvar sústavy v súradnici x .

Pre kapacitu jednomorfného piezoelektrického nosníka s konfiguráciou z obrázka (5.1) platí vzťah ako pre doskový kondenzátor:

$$C_p = \frac{L_e b_e \varepsilon_{33}^T \varepsilon_0}{h_p} \quad (5.30)$$

kde L_e , b_e je dĺžka, šírka elektródy, ε_{33}^T , ε_0 sú relatívna permitivita pri konštantnom napätí a permitivita vákua, h_p je hrúbka piezoelektrickej vrstvy.

Budenie základne s výchylkou v modálnych súradniciach je podľa druhého pohybového zákona $\mathbf{f}(t) = -\mathbf{M}\phi_1 a(t)$. Pohybová rovnica (5.27) zahrňujúca piezoelektrický efekt a elektrická rovnica (5.10) v modálnych súradniciach sú:

$$\phi_1^T \mathbf{M} \phi_1 \ddot{y}(t) + \phi_1^T \mathbf{C} \phi_1 \dot{y}(t) + \phi_1^T \mathbf{K} \phi_1 y(t) + \vartheta v(t) = -\phi_1^T \mathbf{M} \phi_1 a(t) \quad (5.31)$$

$$C_p \dot{v}(t) + \frac{v(t)}{R_z} = \vartheta \dot{y}(t) \quad (5.32)$$

S využitím (5.23 až 5.26) a spätnej transformácie podľa (5.17) majú vzťahy vo fyzikálnych súradniciach pre voľný koniec zjednodušený tvar, kde $\vartheta^* = \frac{\vartheta}{\phi_1(L)}$

$$\ddot{u}(t) + 2\xi\omega_1 \dot{u}(t) + \omega_1^2 u(t) + \vartheta^* v(t) = -a(t) \quad (5.33)$$

$$C_p \dot{v}(t) + \frac{v(t)}{R_z} = \vartheta^* \dot{u}(t). \quad (5.34)$$

V prípade harmonického budenia je možné využiť, že napäťová a amplitúdová odozva budú mať takisto harmonický priebeh. Veličiny s časovou zložkou sa nahradia predpokladaným riešením v tvaroch $v(t) = V_0 e^{i\Omega_b t}$, $u(t) = U_0 e^{i\Omega_b t}$ a $a(t) = A_0 e^{i\Omega_b t}$ resp. deriváciami predpokladaných riešení. Po vydelení $e^{i\Omega_b t}$ majú elektromechanické rovnice pri harmonickom budení vo fyzikálnych súradniciach tvar:

$$-U_0 \Omega_b^2 + i2\xi U_0 \omega_1 \Omega_b + U_0 \omega_1^2 + V_0 \vartheta^* = -A_0 \Omega_b^2 \quad (5.35)$$

$$iV_0 C_p \Omega_b + \frac{V_0}{R_z} = iU_0 \vartheta^* \Omega_b, \quad (5.36)$$

kde U_0 je amplitúda výchylky voľného konca vo fyzikálnych súradniciach, V_0 je amplitúda elektrického napätia a A_0 je amplitúda zrýchlenia základne, Ω_b je budiaca frekvencia, ω_1 je prvá vlastná frekvencia sústavy.

5.2 Model s jedným stupňom voľnosti - SDOF

K modelu NDOF existuje pre špeciálny prípad jednostranne votknutého prične kmitajúceho nosníka alternatíva v podobe jednoduchšieho modelu SDOF, ktorý má parametre sústredené na konci nosníka. Matice hmotnosti a tuhosti sa tak nahradia ekvivalentnými hodnotami hmotnosti a tuhosti pre voľný koniec [67, 68]

$$m_{ekv} = \frac{33}{140} ML + m_z \quad (5.37)$$

$$k_{ekv} = \frac{3EJ}{L^3}, \quad (5.38)$$

kde M, L sú hmotnosť a dĺžka kompozitu, m_z je hmotnosť závažia a EJ je ohybová tuhosť kompozitu. Je treba podotknúť, že tieto vzťahy uvažujú rovnaké dĺžky oboch vrstiev a

bodovú hmotu ideálne na konci nosníka. V takom prípade je prvá vlastná frekvencia daná vzťahom

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{3EJ}{L^3(\frac{33}{140}ML + m_z)}} \quad (5.39)$$

Pre hodnotu tlmenia C_{ekv} platí vzťah (5.26), kde je matica hmotnosti nahradená ekvivalentnou hmotnosťou, pre kapacitu piezoelektrického nosníka C_p a člen elektromechanickej premeny platia vzťahy (5.30 a 5.29). Prvý vlastný ohybový tvar sústavy je nájdený pomocou (5.13), kde λ je koreňom charakteristickej rovnice (5.12). Pri normovaní vlastného tvaru vzhľadom k hmotnosti platí

$$\int_0^L \phi^2(x) dx = \frac{1}{m_{eq}}. \quad (5.40)$$

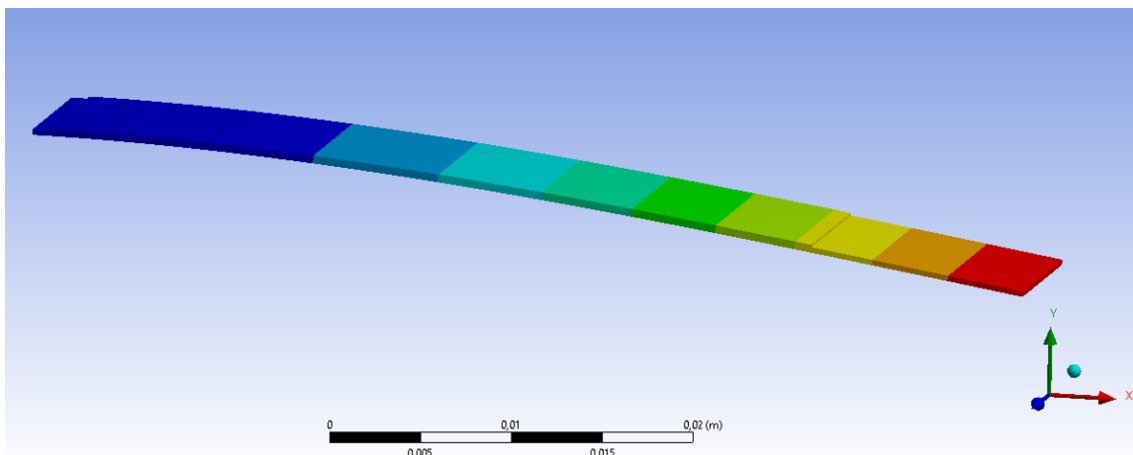
a systém môže byť popísaný elektromechanickými dynamickými rovnicami (5.33 a 5.34).

5.3 Model v MKP programe

Pre overenie výsledkov modelov z prostredia Matlab a Simulink je vytvorený model v MKP programe Ansys Workbench. Ten disponuje modulom *Piezoelectric and MEMS*, umožňujúcim analýzu piezoelektrickej štruktúry.

Keďže sieť geometrie celého kompozitu je tvorená 3D prvkami SOLID a model v Matlabe vychádza z Euler-Bernoulliho prutovej teórie, je nutné pri definícii anizotropného materiálu kompozitu zamedziť šmyk a dosiahnuť tak zrovnateľnosť s prvkom BEAM. Sieť piezoelektrického nosníka by mala odpovedať prostrediu Matlab a teda byť tvorená minimálne takou veľkosťou elementu, s akou presnosťou sú definované dĺžky jednotlivých častí.

Na nosníku je plocha vymedzená pre distribuovanú hmotu (Distributed Mass) a na PVDF vrstve je plocha určujúca miesto, na ktorom sa elektróda v skutočnosti nachádza.



Obrázok 5.3: Piezoelektrický nosník v modálnej analýze Ansys Workbench.

V prípade priameho piezoelektrického javu, kedy sa generované napätie odmeriava na rezistore, sú pri modelovaní potrebné štyri objekty, a to:

- *Piezoelectric Body* - priradenie piezoelektrických vlastností a permitivity materiálu so zvolením osi polarizácie. (Pre substrát je tento atribút definovaný tiež, avšak bez piezoelektrických vlastností a s vysokou permitivitou).
- *Voltage* - elektrická okrajová podmienka, ktorou sa definuje nulový potenciál
- *Voltage Coupling* - elektrická okrajová podmienka definujúca elektródu
- *Resistor* - vytvorenie rezistora pomocou prvku CIRC94, na ktorom bude merané napätie. Modul *Piezoelectric and MEMS* vo svojich možnostiach rezistor neponúka, avšak je možné ho vytvoriť prostredníctvom príkazového úryvku (Command Snippet).

Pre potreby overenia modelov z Matlabu boli vybrané modálna, harmonická a prechodová analýza.

6 Odozva piezoelektrického nosníka v modeloch

Táto kapitola sa zaoberá porovnaním napäťovej odozvy troch zostavených modelov piezoelektrického nosníka v časovej oblasti, vo frekvenčnej oblasti, vzťahmi pre výpočet piezoelektrických konštánt a k -faktora premeny energie. Pre overenie správnosti modelov boli prevzaté nasledovné parametre komerčného výrobcu PVDF [38].

Tabuľka 6.1: Vlastnosti PVDF použité v simuláciách.

Y [GPa]	η [-]	ρ [kg/m ³]	ε_{31} [-]	ε_{33} [-]	d_{31} [pC/N]	d_{33} [pC/N]
2	0.34	1760	12	12	-19	20

6.1 Odozva v časovej oblasti

Pomerný útlm ξ vstupujúci do modelov je vypočítaný z napäťovej odozvy voľných tlmených kmitov, pretože sa jedná o systém s jedným stupňom voľnosti a systém redukovaný na jeden stupeň voľnosti. V prípade systému s N stupňami voľnosti sa tlmenie vyjadruje pomocou Rayleighoveho vzťahu.

6.1.1 Pomerný útlm

Stanovenie pomerného útlmu z napäťovej odozvy vychádza z určenia logaritmického dekrementu, čo je prirodzený logaritmus podielu dvoch po sebe nasledujúcich amplitúd napätia rovnakej polarít, teda posunutých o periódu T . Pre pomerný útlm potom platí (6.2)

$$\delta_{dekr} = \ln \frac{x(t)}{x(t+T)} \quad (6.1)$$

$$\xi = \frac{\delta_{dekr}}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta_{dekr}^2}}. \quad (6.2)$$

Rayleighovo tlmenie je možné z pomerného útlmu vyjadriť pomocou vzťahu

$$\xi = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_R}{\omega} + \beta_R \Omega \right), \quad (6.3)$$

kde koeficienty α, β reprezentujú Rayleighove koeficienty tlmenia proporcionálne hmotnosti a tuhosti, ω predstavuje budiacu frekvenciu. Z toho vyplýva, že pomerný útlm sa mení s frekvenciou, avšak pre tento model je rozpätie budiacich frekvencií malé, respektíve pohybuje sa v blízkosti prvej rezonančnej frekvencie, takže sa pomerný útlm môže považovať za konštantný.

Klasické Rayleighovo tlmenie má tvar

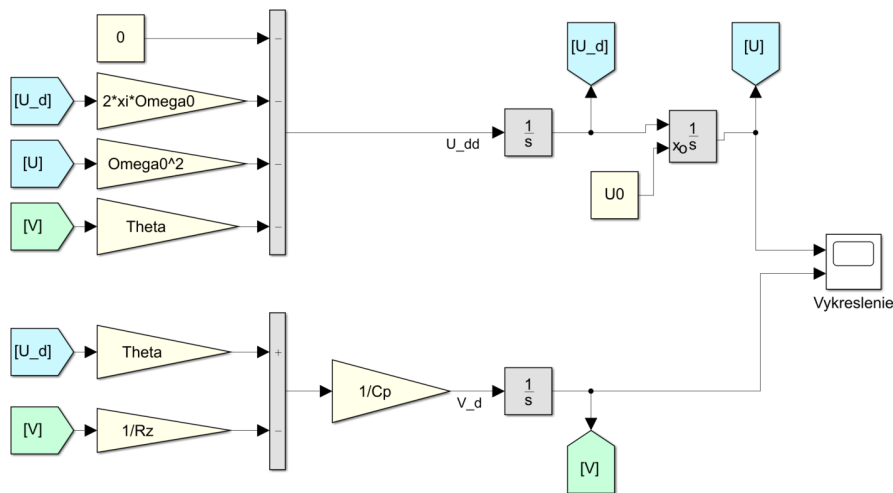
$$\mathbf{C} = \alpha_R \mathbf{M} + \beta_R \mathbf{K}, \quad (6.4)$$

kde \mathbf{C} je matica tlmenia, \mathbf{M} je matica hmotnosti a \mathbf{K} je matica tuhosti. V praxi je však koeficient α_R tak malý, že sa zanedbáva a vzťah pre Rayeighovo tlmenie je teda možno zjednodušiť na

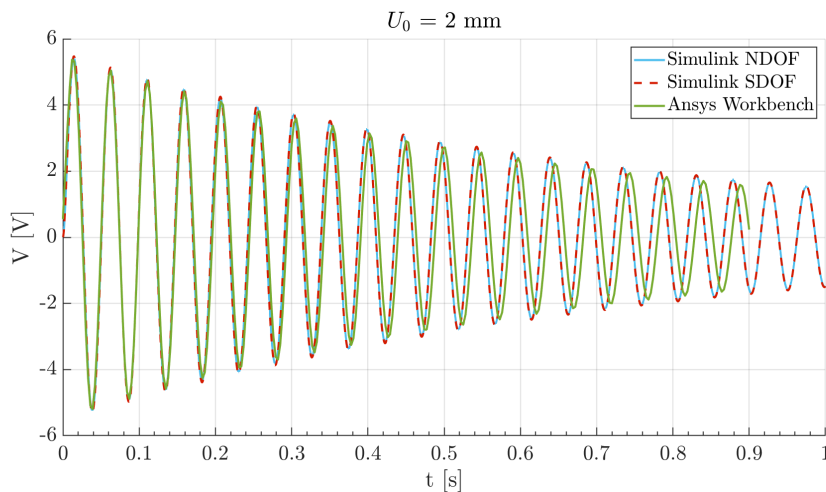
$$\mathbf{C} = \beta_R \mathbf{K}. \quad (6.5)$$

6.1.2 Voľné tlmené kmitanie

Amplitúda výchylky voľného konca a napätia na odporovej záťaži, ktoré vzniknú pri tlmenom kmitaní z počiatočnej výchylky voľného konca môžu byť podľa diferenciálnych rovníc (5.33 a 5.34) jednoducho analyzované v prostredí Simulink. Príklad prevedenia je na obrázku 6.1. V takomto tvare je model využiteľný pre SDOF aj pre redukovaný NDOF model.



Obrázok 6.1: Simulácia časovej odozvy výchylky a napätia.



Obrázok 6.2: Porovnanie modelov v napäťovej odozve tlmených kmitov.

6.2 Odozva vo frekvenčnej oblasti

Z hľadiska určenia piezoelektrických vlastností je hlavná pozornosť venovaná odozve vo frekvenčnej oblasti. Vzťahy pre amplitúdu výchylky voľného konca a amplitúdu napätia sú využité pre výpočet elektromechanického člena premeny.

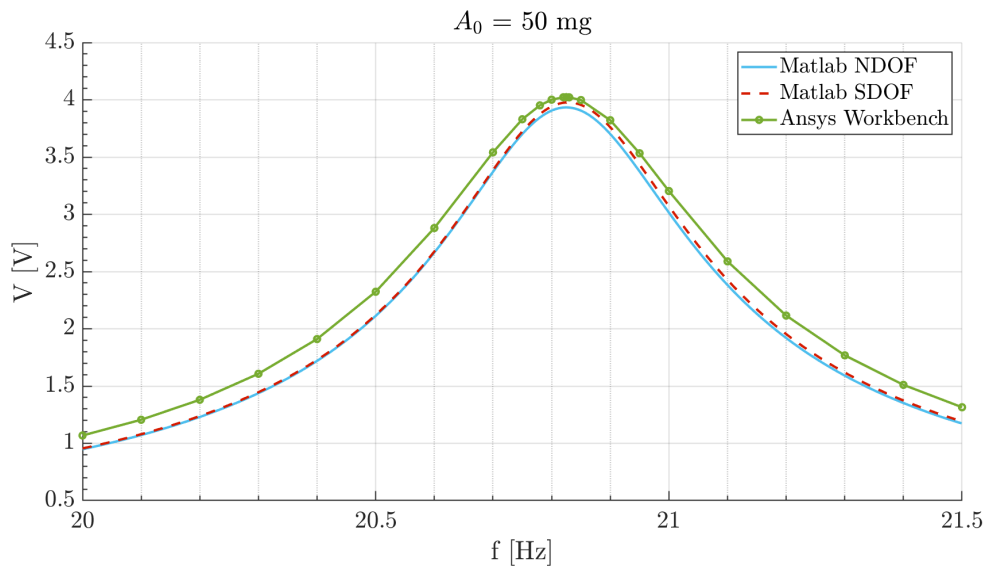
6.2.1 Harmonické budenie

Simulácia amplitúdy napätovej odozvy piezoelektrického nosníka v prostredí Matlab vychádza zo vzťahov (5.35, 5.36). Vyjadrením amplitúdy výchylky z (5.35) a dosadením do (5.36) sa získa amplitúda napätia pri ľubovoľnej budiacej frekvencii Ω_b .

$$V_0 = \frac{iA_0\Omega_b^2\Omega_b\vartheta^*}{i\Omega_b\vartheta^{*2} + ((-\Omega_b^2 + i2\xi\omega_1\Omega_b + \omega_1^2)(iC_p\Omega_b + \frac{1}{R_z}))} \quad (6.6)$$

Podobne, pre amplitúdu výchylky voľného konca sa z (5.36) vyjadří amplitúda napätia a dosadí do (5.35). Vzťah pre amplitúdu výchylky má tak tvar

$$U_0 = \frac{-A_0\Omega_b^2(iC_p\Omega_b + \frac{1}{R_z})}{\left[(-\Omega_b^2 + i2\xi\omega_1\Omega_b + \omega_1^2)(iC_p\Omega_b + \frac{1}{R_z})\right] (i\vartheta^{*2}\Omega_b)}. \quad (6.7)$$



Obrázok 6.3: Porovnanie modelov v napätovej odozve na kinematické budenie.

Z grafu je zrejmé, že výsledky modelov Ansys Workbench, Matlab NDOF a Matlab SDOF sú porovnateľné, avšak výpočetný čas programu v Matlabe je niekoľkonásobne nižší. V prípade komplexnejšej geometrie, než je jednodušný piezoelektrický nosník by model SDOF zrejme nebol postačujúcim, avšak pre testovanie sa zložitejšia geometria nepredpokladá a model je pre toto využitie vhodný.

6.3 Piezoelektrické vlastnosti

Z vytvorených modelov sa pre stanovenie piezoelektrických vlastností využijú programy Matlab NDOF, SDOF a Simulink, pretože Ansys Workbench neumožňuje výpočty bez voľby pred daných piezoelektrických vlastností.

6.3.1 Piezoelektrické konštanty e_{31} , d_{31}

Člen elektromechanickej premeny ϑ^* sa dá pri známej amplitúde napätia počas harmonického budenia vyjadriť pomocou kvadratickej rovnice, výslednou hodnotou je absolútna hodnota menšieho z komplexných koreňov.

$$iV_0\Omega_b\vartheta^{*2} - iA_0\Omega_b^2\Omega_b\vartheta^* + \left(\frac{V_0}{R_z} + iV_0C_p\Omega_b\right)(-\Omega_b^2 + i2\xi\omega_1\Omega_b + \omega_1^2) = 0 \quad (6.8)$$

Ďalší možný spôsob určenia člena elektromechanickej premeny vychádza z rovnice (5.34), kde pri známej rýchlosti voľného konca $\dot{u}(t)$ je možné podobne ako v predchádzajúcom odvodení odstrániť harmonickú zložku $e^{i\Omega_b t}$ a vzťah nadobudne tvar

$$\vartheta^* = \frac{V_0(iC_p\Omega_b + \frac{1}{R_z})}{U_0i\Omega_b}. \quad (6.9)$$

Piezoelektrická konštantá e_{31} vo vzťahu (6.8) vystupuje v člene elektromechanickej premeny ϑ^* . Jej vyjadrenie je tak

$$e_{31} = \frac{-\vartheta^*\phi_1(L)}{b_e(z_{Tp} - z_n) \left| \frac{d\phi_1(x)}{dx} \right|_{x=x_1}^{x=x_2}} \quad (6.10)$$

Konštantá d_{31} vychádza z (3.10), pre namáhanie v móde 31 môže byť približne vyjadrená ako

$$d_{31} = -(s_{11}^E + s_{12}^E)e_{31} \quad (6.11)$$

6.3.2 Elektromechanický faktor premeny k_{31}

Zo vzťahu (3.11) pre namáhanie v ohybovom móde plyní

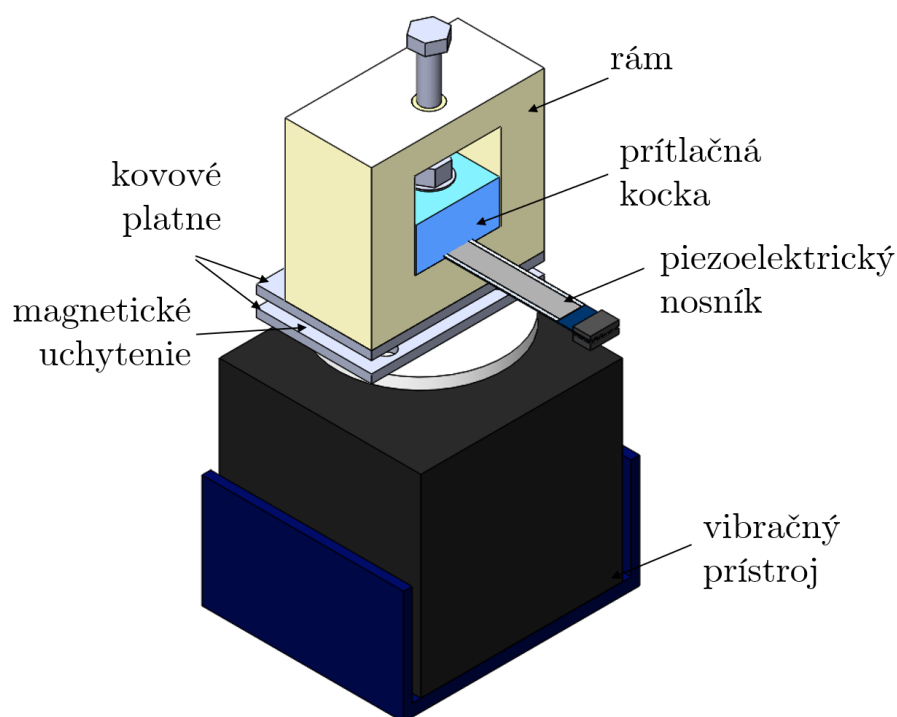
$$k_{31} = \sqrt{\frac{d_{31}^2(c_{11}^E + c_{21}^E)}{\varepsilon_{33}^T}} \quad (6.12)$$

7 Odozva piezoelektrického nosníka z experimentu

Kapitola podáva informácie o skutočnej napäťovej odozve dvoch vzoriek PVDF vrstvy pri kinematickom buzení v rôznych frekvenciách. Ďalej určuje elektrický výkon, ktorého je vrstva schopná za daných podmienok.

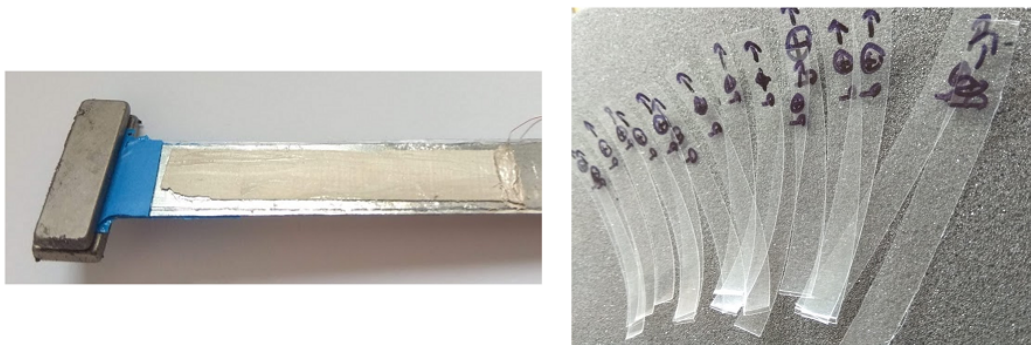
7.1 Skúšobný aparát

Pre účely testovania piezoelektrických vlastností PVDF vzoriek fólií bola navrhnutá konštrukcia zložená z pevného rámu, prítlačného kvádra a ťahovacieho šróbu. Zadná časť vymedzuje polohu kvádra a nosníka kolmo na rám. Budenie je zaistené vibračnou plošinou s nastaviteľnou amplitúdou zrýchlenia a frekvenciou.



Obrázok 7.1: Aparát pre stanovenie piezoelektrických vlastností.

Vzhľadom na mechanické vlastnosti PVDF fólie je pre testovanie nutné zabezpečiť prilnutie k povrchu substrátu, v opačnom prípade by kmitanie fólie nebolo lineárne. Takisto sa vyžaduje naniesť, pokiaľ možno, čo najtenšiu vrstvu elektródy na povrch PVDF fólie umiestnenej na nosníku.



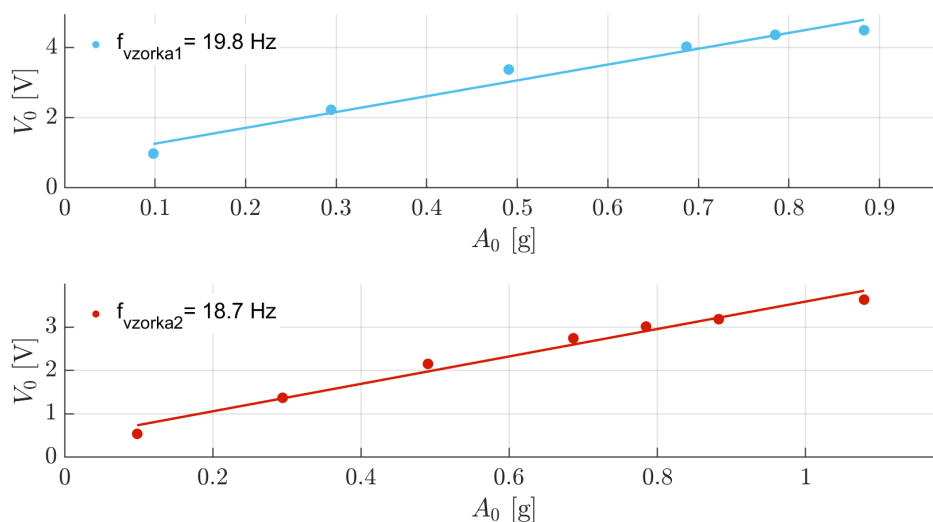
Obrázok 7.2: Prevedenie spojenia vrstiev a vzorky PVDF fólie.

7.2 Parametre experimentálnej sústavy a modelov

V tabuľke 7.1 sú uvedené parametre dvoch testovaných a simulovaných piezoelektrických nosníkov spolu s ďalšími katalógovými parametrami PVDF a nosníka. Pomerný útlm bol stanovený ako priemerná hodnota pomerných útlmov z poľa amplitúd napäťovej odozvy v čase podľa vzťahov (6.1) a (6.2).

7.3 Overenie lineárneho správania

Vytvorené modely na základe Euler-Bernoulliho teórie predpokladajú, že piezoelektrický nosník sa pohybuje počas harmonického budenia základne v lineárnej oblasti, linearita by mala platiť aj pre elektrické veličiny. Zo vzťahu (6.6) vyplýva, že amplitúda napätia je priamo úmerná amplitúde zrýchlenia pri danej budiacej frekvencii. Na obrázku je experimentálne overenie tohoto predpokladu z nameraného napätia pri známom zrýchlení.



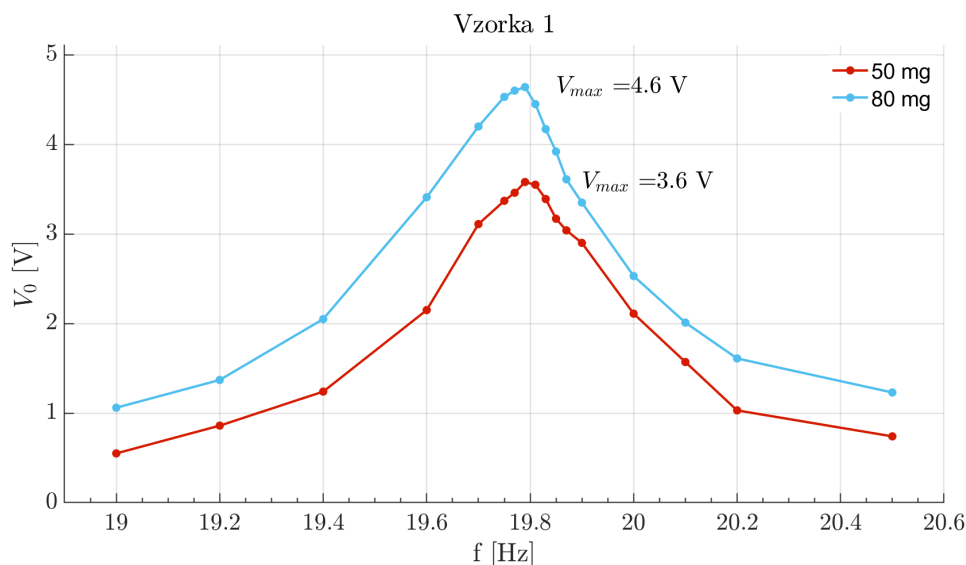
Obrázok 7.3: Závislosť amplitúdy napätia na amplitúde zrýchlenia, $R_z = 10 \text{ M}\Omega$.

Tabulka 7.1: Parametre testovaných a modelovaných piezoelektrických nosníků.

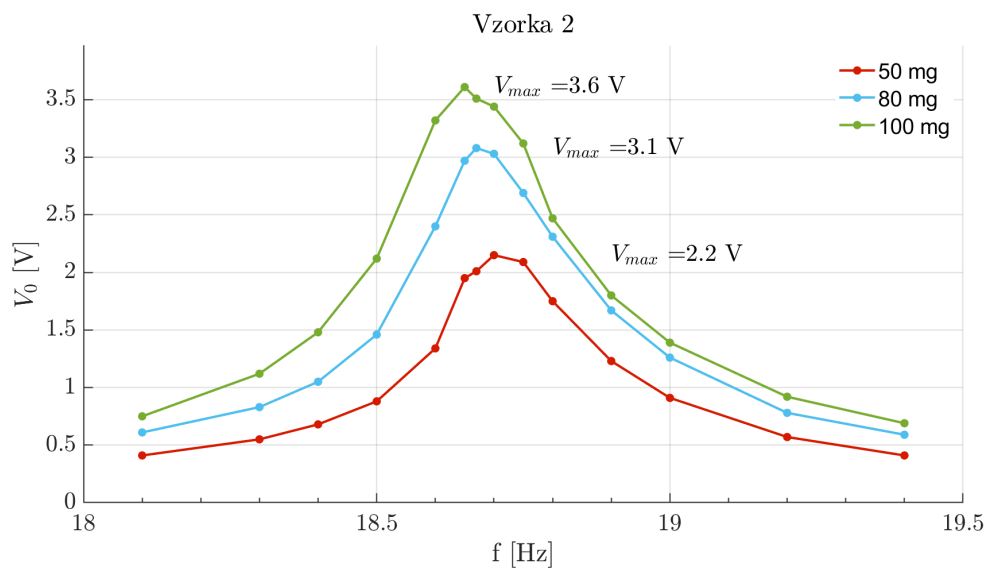
PARAMETER	OZNAČENIE	VZORKA 1	VZORKA 2
dĺžka [mm]			
substrát	L	56.0	71.9
PVDF	L_p	48.0	63.0
elektroda	L_e	43.0	48.2
závažie	L_z	6	4
odsadenie od votknutia	Offset	1	1
hmotnosť závažia [g]	m_M	5.5	2.6
pomerný útlm [-]	ξ	0.012	0.013
šírka [mm]			
elektroda	b_e	7.5	8.0
substrát a PVDF	b	10	
hrúbka [mm]			
substrát	h_s	0.30	
PVDF	h_p	0.13	
hustota [kg/m ³]			
substrát	ρ_s	7850	
PVDF	ρ_p	1760	
Youngov modul [Pa]			
substrát	Y_s	$2.1 \cdot 10^{11}$	
PVDF	Y_p	$2.0 \cdot 10^9$	
relatívna permitivita [-]			
PVDF	$\varepsilon_{31}, \varepsilon_{33}$	12	

7.4 Napěťová odozva vo frekvenčnej oblasti

Vstup pre oba spôsoby určovania piezoelektrických vlastností je amplitúdovo frekvenčná charakteristika pri harmonickom budení. Výstupné napätia boli namerané pre rôzne zrýchlenia, okrem iného podávajú informáciu o výstupnom elektrickom výkone piezogenerátora.



Obrázok 7.4: Napěťová odozva na rôzne kinematické budenie prvej vzorky, $R_z=10\text{ M}\Omega$.

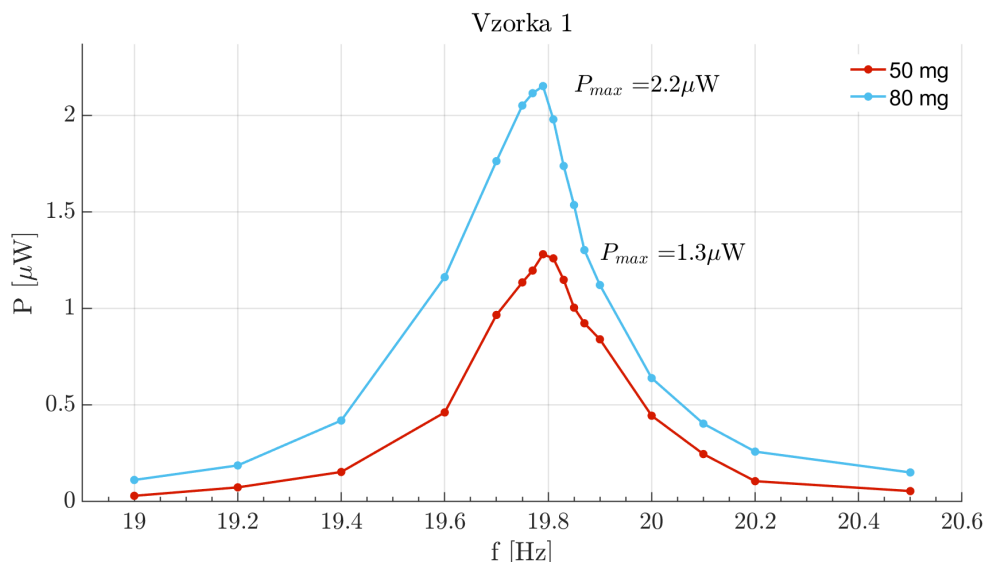


Obrázok 7.5: Napěťová odozva na rôzne kinematické budenie druhej vzorky, $R_z=10\text{ M}\Omega$.

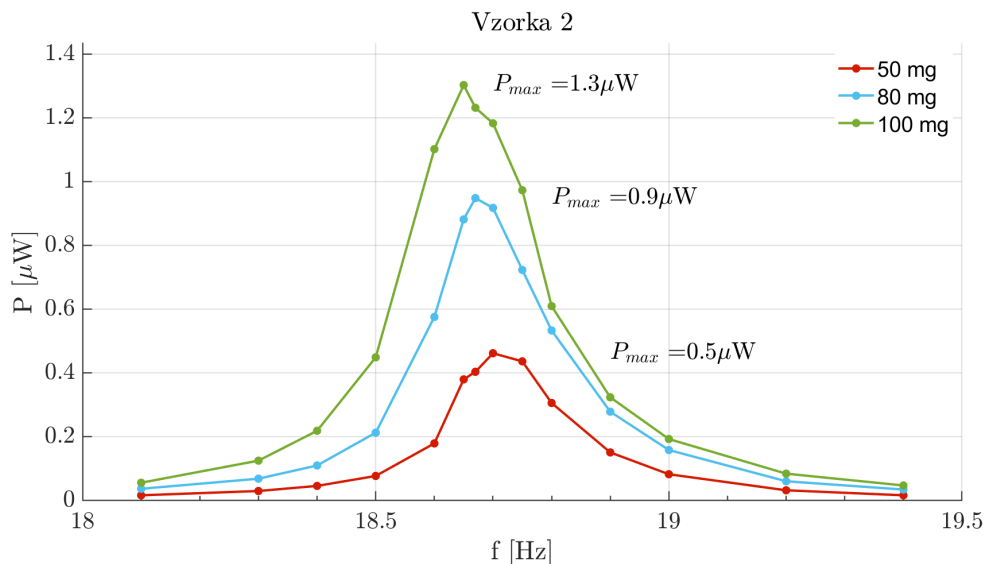
7.5 Elektrický výkon

Z napätia nameraného na odpore R_z je elektrický výkon daný vzťahom

$$P_{el} = \frac{V^2}{R_z} \quad (7.1)$$



Obrázok 7.6: Výkon pri rôznom kinematicom budení prvej vzorky, $R_z = 10 \text{ M}\Omega$.



Obrázok 7.7: Výkon pri rôznom kinematicom budení druhej vzorky, $R_z = 10 \text{ M}\Omega$.

Z experimentu vypýva, že PVDF vrstva bude v rezonančnom stave sústavy generovať výkon v rádoch desiatín až jednotiek μW . Hlavný príspevok hmotnosti a tuhosti sústavy tvorí substrát so závažím, ktorých zmena sa prejavuje vo vlastnej frekvencii celého systému. Významný vplyv na vlastnú frekvenciu má aj votknutie, teda uchytenie vzorky. Z hľadiska testovania vzoriek je žiadúce, aby tieto podmienky boli vždy rovnaké.

8 Určenie piezoelektrických vlastností

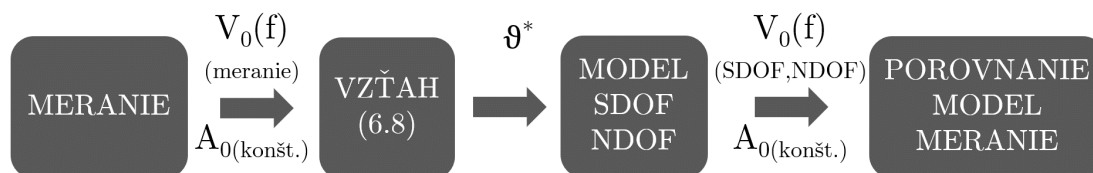
Kapitola overuje výsledky získané dvoma spôsobmi výpočtu člena elektromechanickej premeny a porovnáva ich aj prostredníctvom reprodukovanej napäťovej charakteristiky. Na záver vymenúvava vplyvy, ktoré môžu vnášať chyby do merania a vyberá spôsob výpočtu s výsledkami postačujúcimi pre testovanie. Uvedené výsledky vychádzajú z parametrov a merania druhej vzorky.

8.1 Piezoelektrické konštanty z napätia

Spôsob výpočtu vychádza zo vzťahu (6.8). Pre využitie tohoto vyjadrenia je dôležité, aby vlastná frekvencia z modelov odpovedala čo najviac meraniu. V opačnom prípade sa chyba výpočtu začne kumulovať postupne od člena elektromechanickej premeny ϑ^* až po k -faktor. Výsledky piezoelektrických konštánt sú prijateľné do rozdielu vlastných frekvencií modelu a skutočnej sústavy približne 0.5 Hz.

Tabuľka 8.1 sumarizuje vypočítané parametre druhej vzorky na základe namera-ného napäťového výstupu pri zrýchlení základne $A_0 = 50 \text{ mg}$ vo frekvenčnom spektre. Do vzťahu (6.8) vstupuje budiaca frekvencia, amplitúda zrýchlenia, výstupné napätie z merania a vlastná frekvencia sústavy vypočítaná z daného modelu. Z vektora konštánt ϑ^* je vybraných 5 hodnôt v okolí rezonancie a aritmetickým priemerom je určená výsledná konštanta ϑ^* PVDF vrstvy z merania.

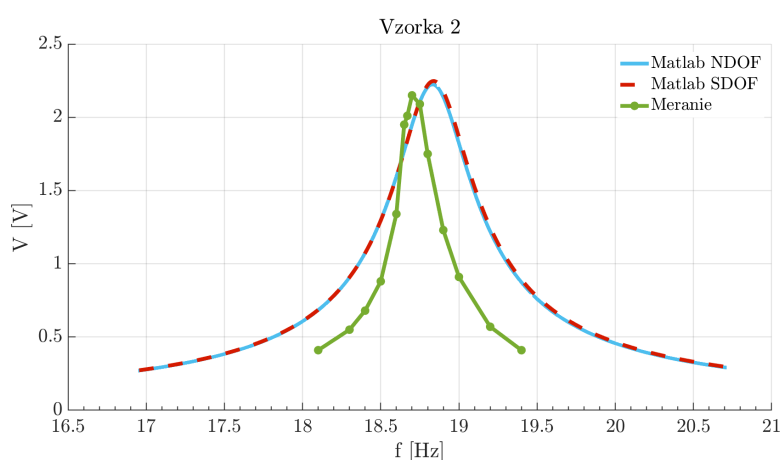
Bloková schéma na obrázku 8.1 ozrejmjuje postup pri zisťovaní piezoelektrických vlastností spolu s overením výsledkov, ktoré sú spätne porovnávané s meraním. Na obrázku 8.2 je reprodukcia výstupného napätia podľa vzťahu (6.6) z modelov NDOF a SDOF na základe vypočítanej konštanty ϑ^* z merania napätia.



Obrázok 8.1: Schéma metódy určovania piezoelektrických vlastností z napätia a z frekvencie.

Tabuľka 8.1: Piezoelektrické vlastnosti z merania napätového výstupu a porovnanie výsledkov.

	MERANIE	Matlab NDOF	Matlab SDOF
ϑ^* [Cm]	-	$1.46 \cdot 10^{-6}$	$1.48 \cdot 10^{-6}$
e_{31} [C/m]	-	$-4.71 \cdot 10^{-2}$	$-4.97 \cdot 10^{-2}$
d_{31} [pC/N]	-	-15.55	-16.38
k_{31} [%]	-	10.30	10.86
f_0 [Hz]	18.70	18.83	18.84
V_0 [V]	2.15	2.22	2.25

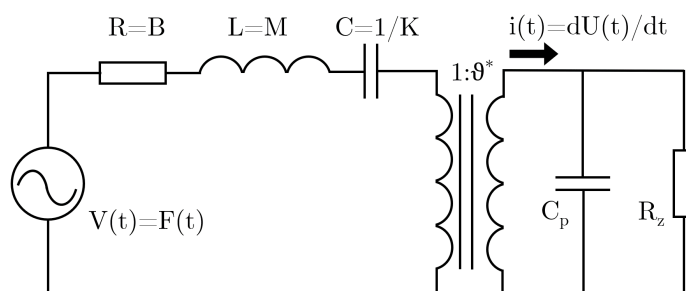
**Obrázok 8.2:** Porovnanie: reprodukované napätie z vypočítanej konštanty a meranie.

V tomto prípade nepresnosť modelov v porovnaní so skutočnou odozvou nie je veľká, pretože v rezonančnej frekvencii je rozdiel necelé 1 % a v amplitúde napätia sa tak nelíšia viac než o 5 %.

8.2 Piezoelektrické konštanty z napätia a z rýchlosti

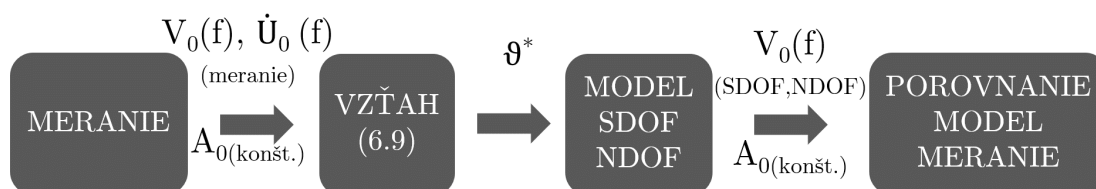
Druhým spôsobom zistenia piezoelektrických konštánt je meranie rýchlosti výchylky voľného konca a výstupného napätia vo frekvenčnom spektre pri danej amplitúde zrýchlenia. Člen elektromechanickej premeny odpovedá rovnici (6.9) a vychádza z elektrickej časti schémy elektromechanickej analógie, viď obrázok (8.3).

Ľavá (mechanická) časť je nahradená ekvivalentnými elektrickými prvkami. V prípade tlmenia ide o rezistor, pre hmotnosť je to cievka a pre tuhosť je to prevrátená hodnota kapacity kondenzátora. Budenie silou je nahradené ekvivalentným striedavým napätím. Prúd je úmerný derivácii polohy podľa času, v tomto prípade rýchlosti voľného konca nosníka. Elektromechanický člen reprezentuje transformačný pomer transformátora medzi jednotlivými časťami.



Obrázok 8.3: Elektromechanická analógia.

Bloková schéma 8.4 znázorňuje postup pri výpočte piezoelektrických vlastností a ich overenie prostredníctvom merania výstupného napätia a rýchlosti voľného konca vo frekvenčnom spektre. Zo vzťahu (6.8) sú získané členy elektromechanickej premeny pre každú hodnotu napätia pri danej budiacej frekvencii. Z tohoto vektora je určená jedna reprezentatívna hodnota vstupujúca do obch modelov NDOF a SDOF.



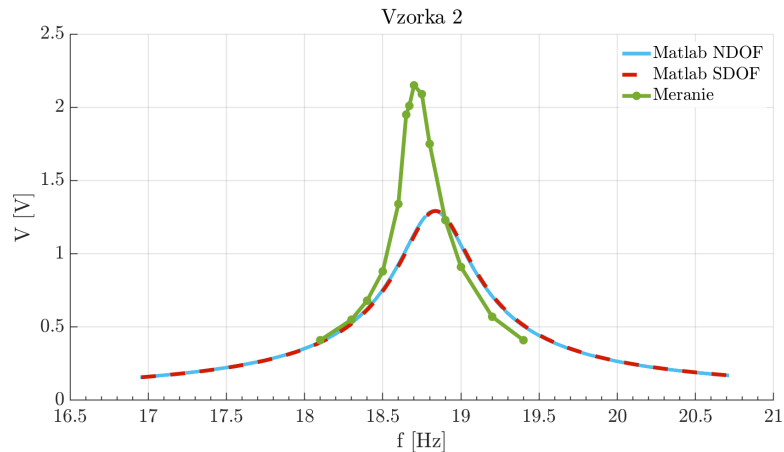
Obrázok 8.4: Bloková schéma výpočtu pomocou merania napätia a rýchlosti.

V tabuľke nižšie sa nachádza prehľad vypočítaných piezoelektrických konštánt pomocou modelov z člena elektromechanickej premeny určeného uvedenou metódou. Rozdiely

Tabuľka 8.2: Porovnanie modelov s meraním a piezoelektrické konštanty z merania napätia a rýchlosti.

	MERANIE	Matlab NDOF	Matlab SDOF
ϑ^* [Cm]	$0.85 \cdot 10^{-6}$	-	-
e_{31} [C/m]	-	$-2.74 \cdot 10^{-2}$	$-2.85 \cdot 10^{-2}$
d_{31} [pC/N]	-	-9.04	-9.42
k_{31} [%]	-	5.99	6.24
f_0 [Hz]	18.70	18.83	18.84
V_0 [V]	2.15	1.29	1.29

vo veľkosti elektromechanického člena sa prejaví na amplitúde napätia v oboch modeloch viď obrázok 8.5. Krivka sa nachádza pod očakávanou charakteristikou, čoho vyplýva, že vypočítaný člen elektromechanickej premeny by mal byť v skutočnosti väčší.



Obrázok 8.5: Amplitúdovo frekvenčná charakteristika druhej vzorky.

8.3 Faktory ovplyvňujúce sústavu

Odhliadnuc od použitých metód určovania piezoelektrických vlastností, do meranej sústavy môžu vstupovať chyby dané niekoľkými faktormi. Prvým vplyvom je presnosť merania rozmerov piezoelektrického nosníka. Pri menších rozmeroch vzoriek ako je napríklad vzorka 1 majú aj malé zmeny v jednotkách či desatinách milimetrov výrazný vplyv na vlastnú frekvenciu a výstupné napätie v modeloch.

Ďalším, a azda najväčším vplyvom, je votknutie, respektíve uchytenie nosníka ku konštrukcii a poloha hmoty na konci nosníka. Nesprávnym uchytením nosníka na tom istom skúšobnom aparáte behom experimentu došlo k zmene vlastnej frekvencie o vyše 0.6 Hz. Je preto vhodné upevňovať nosník meranou silou tak, aby bola zaručená opakovateľnosť experimentu a votknutie sa podľa možnosti čo najviac blížilo tomu v modeli. Závažie na voľnom konci tvoria magnety, pod ktorými je umiestnená ochranná páska zabráňujúca poškodeniu pripevnenia PVDF. Jej váha približne 0.1 až 0.2 g na konci nosníka nie je zanedbateľná a musí sa v modeloch zohľadniť.

Na odchýlke od modelov sa podieľa aj spoj medzi nosníkom a PVDF vrstvou, takisto ako elektróda zo striebornej pasty na vrchnej časti nosníka, ktoré v modeloch zahrnuté nie sú.

8.4 Zhrnutie výsledkov

Z meraní vyplýva, že vzorky PVDF fólie vykazujú lineárne správanie napäťového výstupu v rozsahu amplitúd zrýchlenia $A_0 = 0.1$ až 1 g .

Zdanlivo efektívnejší spôsob určovania piezoelektrických vlastností pomocou merania rýchlostí laserovým snímačom a výstupného napätia pre rôzne frekvencie sa z dvoch prezentovaných spôsobov výpočtu ukázal ako ten menej presný. Tento spôsob si pre určenie člena elektromechanickej premeny ϑ^* vyžaduje okrem meraných parametrov iba konštantné hodnoty kapacity piezoelektrickej vrstvy a odporovej záťaže, no pri spätnej

reprodukcii výstupného signálu je možné vidieť, že hodnota amplitúdy napätia a konštanty ϑ^* je za daných podmienok na reálnej vzorke vyššia.

Naopak, postačujúce výsledky pri kinematickom budení sú dosiahnuteľné pomocou metódy vychádzajúcej zo vzťahu (6.8). Piezoelektrické vlastnosti takto určené boli overené prostredníctvom výstupnej amplitúdy napätia. Ako bolo spomínané, pre čo najlepšie výsledky je dôležité dosiahnutie vlastnej frekvencie z modelov v blízkosti rezonančnej frekvencie reálnej sústavy. Výsledok tejto metódy je porovnateľný s katalógovými hodnotami, napríklad s [37]

Tabuľka 8.3: Porovnanie výsledku s výrobcom

piezoelektrické vlastnosti	NDOF	SDOF	[37]
d_{31} [pC/N]	-15.46	-15.14	-14.00
k_{31} [%]	10	10	10

Namerané odozvy PVDF na kinematické budenie a stanovené piezoelektrické vlastnosti potvrdzujú zaradenie tohoto materiálu v ohybovom móde z hľadiska energy harvesting do skupiny senzorov informujúcich o stave či poruche s rádovo μW výkonom. Pre účel porovnávania vlastností rôznych PVDF vzoriek je podľa dosiahnutých výsledkov vhodnejší prvý spôsob vychádzajúci zo vzťahu (6.8), pretože funguje na základe zámeny neznámeho parametra z modelov v kapitole 5, kde je namiesto neznámej amplitúdy napätia hľadaný neznámy člen elektromechanickej premeny.

9 Záver

Diplomová práca sa zaoberala návrhom testovacieho prípravku piezoelektrických vlastností PVDF vrstvy. Vyvíjané vzorky PVDF podľa procesu výroby disponujú rozdielnymi piezoelektrickými vlastnosťami, ktoré je možné pomocou navrhnutého testera identifikovať a vzájomne porovnávať. Práca je zložená z dvoch hlavných častí, teoretickej a praktickej.

Rešeršná časť vysvetlila piezoelektrický jav a poskytla stručný prehľad o piezoelektrických materiáloch, podala informácie o typoch štruktúr vyrábaných z PVDF a o kompozitoch s PVDF materiálom, z čoho boli vyvedené vhodné smery namáhania pre dané štruktúry. Vzťahy v súvislosti s popisom piezoelektrického materiálu a deja boli definované a posledná kapitola teoretickej časti načrtla rôzne oblasti využitia PVDF štruktúr ako snímača.

Pre testovanie piezoelektrických vlastností PVDF v ohybovom móde bol zvolený jednodomý jednostranne votknutý piezoelektrický nosník s hmotou na voľnom konci ako súčasť skúšobného aparátu. Správanie piezoelektrického nosníka bolo analyzované pomocou vytvorených modelov. S vlastnosťami materiálu uvádzanými inými výrobcami bol zostavený model s N stupňami voľnosti (NDOF) na základe Euler-Bernoulliho teórie v MKP a model s jedným stupňom voľnosti (SDOF). Oba tieto modely vytvorené v prostredí Matlab a Simulink boli verifikované pomocou MKP programu ANSYS Workbench. Výsledky harmonickej a časovej odozvy všetkých modelov boli porovnateľné, avšak cesta k nim bola rôzna z hľadiska časovej náročnosti a využiteľnosti pre zložitejšie prípady. Model v prostredí Workbench mal najväčšie nároky na výpočetný čas, zatiaľ čo model SDOF by mohol zlyhávať pri komplexnejšej geometrii. Tá však pre testovanie nebola predpokladaná a model SDOF bol označený za vyhovujúci. Aj keď by bolo možné napríklad pomocou ANSYS APDL zaistiť porovnateľne rýchly výpočet s Matlabom, piezoelektrické vlastnosti tento program určiť nevie, pretože ako vstup potrebuje všetky materiálové a piezoelektrické konštanty. Z toho dôvodu boli pre určenie piezoelektrických vlastností použité modely NDOF a SDOF.

Dva spôsoby vedúce k stanoveniu elektromechanického člena premeny z napäťovej odozvy kinematického budenia boli predstavené, a to využitie vzťahov platiacich pre harmonické budenie piezoelektrického nosníka a využitie vzťahu odvodeného z elektromechanickej analógie za súčasného merania amplitúdy rýchlosti voľného konca.

Zo vzoriek PVDF fólie boli vytvorené dva piezoelektrické nosníky s rôznymi dĺžkami a prídavnými hmotami. Tie boli vložené do navrhutej konštrukcie pre uchytenie k vibračnej plošine. Z merania bola dokázaná linearita výstupného napätia v rezonančnej frekvencii pre rôzne amplitúdy zrýchlenia a z napätia v závislosti na frekvencii pri rôznych amplitúdach zrýchlenia vyplynulo, že výkon vzoriek bol v rozmedzí 0.5 až 2.2 μW .

Počas meraní sa zistilo, že veľký vplyv na vlastnú frekvenciu piezoelektrického nosníka má jeho uchytenie a ďalšie vplyvy sú váha ochrannej pásky na konci nosníka, pri kratších dĺžkach nosníka aj presnosť merania rozmerov, spojenie medzi PVDF a nosníkom a elektróda zo striebornej pasty na povrchu piezoelektrickej vrstvy. Z merania je teda nutné určiť vlastnú frekvenciu reálnej sústavy a v modeli zohľadniť prípadné vplyvy tak, aby sa vlastná frekvencia modelu priblížila čo najviac realite.

Z merania a verifikácie piezoelektrických vlastností pomocou porovnania napätia a vlastnej frekvencie sa zistilo, že prvá metóda vykazuje znateľne lepšie výsledky v porovnaní

s druhou metodou. Napriek tomu však platí, že výpočet je časovo nenáročný a v prípade malého rozdielu vlastných frekvencií modelu a reálnej sústavy poskytuje prvá metóda výpočtu relevantné hodnoty, ktoré odpovedajú piezoelektrickým konštantám uvádzaných v zdrojoch.

Výsledky vo forme piezoelektrických vlastností a odozvy z testovania môžu slúžiť nielen na porovnávanie jednotlivých vzoriek podľa procesu výroby medzi sebou, ale aj pre návrh senzora v aplikáciách vyžadujúcich podávanie informácií o stave.

Zoznam použitej literatúry

- [1] TE, Connectivity Ltd. family of companies. *DT SENSORS* [online]. In: . 2015, s. 2 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.te.com>
- [2] UCHINO, Kenji. *Ferroelectric Devices*. Ilustrované. New York: Marcel Dekker, 2000. ISBN 0-8247-8133-3.
- [3] SAPPATI, K. K. a S. BHADRA. Piezoelectric Polymer and Paper Substrates: A Review. *Sensors* [online]. MDPI, 2018, **18**(11) [cit. 2020-06-16]. DOI: 10.3390/s18113605. ISSN 1424-8220.
- [4] TICHÝ, Jan. *Fundamentals of piezoelectric sensorics: mechanical, dielectric, and thermodynamical properties of piezoelectric materials*. Springer Verlag, 2010. DOI: 10.1007/978-3-540-68427-5. ISBN 3540439668.
- [5] PANDA, P. K. a B. SAHOO. PZT to Lead Free Piezo Ceramics: A Review. *Ferroelectrics* [online]. Taylor & Francis, 2015, **474**(1), 128-143 [cit. 2020-06-16]. DOI: 10.1080/00150193.2015.997146. ISSN 0015-0193.
- [6] NAIN, S., J. S. RATHORE a N. N. SHARMA. Comparison of Piezo-material based Energy Transduction Systems for Artificial Nanoswimmer. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. Institute of Physics Publishing, 2018 [cit. 2020-06-15]. DOI: 10.1088/1757-899X/346/1/012079. ISSN 17578981.
- [7] FUKADA, E. History and recent progress in piezoelectric polymers. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* [online]. IEEE, 2000, **47**(6), 1277-1290 [cit. 2020-06-16]. DOI: 10.1109/58.883516. ISSN 0885-3010.
- [8] PRIYA, Shashank, Hyun-cheol SONG, Yuan ZHOU, et al. A Review on Piezoelectric Energy Harvesting: Materials, Methods, and Circuits. *Energy Harvesting and Systems* [online]. Berlin: Walter de Gruyter, 2017, **4**(1), 3-39 [cit. 2020-06-16]. DOI: 10.1515/ehs-2016-0028. ISSN 23298774.
- [9] YAN, Jing, Min LIU, Young Gyu JEONG, et al. Performance enhancements in poly(vinylidene fluoride)-based piezoelectric nanogenerators for efficient energy harvesting. *Nano Energy* [online]. Elsevier, 2019, **56**, 662-692 [cit. 2020-06-16]. DOI: 10.1016/j.nanoen.2018.12.010. ISSN 2211-2855.
- [10] RAMADAN, Khaled S., D. SAMEOTO a S. EVOY. A review of piezoelectric polymers as functional materials for electromechanical transducers. *Smart Materials and Structures* [online]. 2014, **23**(3), 033001 [cit. 2020-06-16]. DOI: 10.1088/0964-1726/23/3/033001. ISSN 0964-1726.
- [11] BUSHNELL, Dennis M., Z. OUNAIES a J. S. HARRISON. *Piezoelectric Polymers - NASA/CR-2001-211422* [online]. 2001 [cit. 2020-06-16].

- [12] WAGNER, John R., Eldridge M. MOUNT a Harold F. GILES. Polymer Structure-19. *Extrusion*. 2013, s. 225-232. DOI: 10.1016/B978-1-4377-3481-2.00019-3. ISBN 978-1-4377-3481-2.
- [13] LI, Huidong, Chuan TIAN a Z. Daniel DENG. Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials. *Applied Physics Reviews* [online]. AIP Publishing, 2014, **1**(4) [cit. 2020-06-16]. DOI: 10.1063/1.4900845.
- [14] UCHINO, Kenji. *Advanced Piezoelectric Materials: Science and Technology*. 2. vyd. Elsevier Science, 2010. ISBN 1845695348.
- [15] WAN, Chaoying a Christopher Rhys BOWEN. Multiscale-structuring of polyvinylidene fluoride for energy harvesting: the impact of molecular-, micro- and macro-structure. *Journal of Materials Chemistry A* [online]. 2017, **5**(7), 3091-3128 [cit. 2020-06-16]. DOI: 10.1039/c6ta09590a. ISSN 2050-7488.
- [16] YANG, Zhengbao, Shengxi ZHOU, Jean ZU a Daniel INMAN. High-Performance Piezoelectric Energy Harvesters and Their Applications. *Joule* [online]. Elsevier, 2018, **2**(4), 642-697 [cit. 2020-06-16]. DOI: 10.1016/j.joule.2018.03.011. ISSN 2542-4351.
- [17] ZAAROUR, B., L. ZHU, C. HUANG, X. JIN, H. ALGHAFARI, J. FANG a T. LIN. A review on piezoelectric fibers and nanowires for energy harvesting. *Journal of Industrial Textiles* [online]. SAGE Publications, 2019 [cit. 2020-06-16]. DOI: 10.1177/1528083719870197. ISSN 15280837.
- [18] BAE, Ji-hun a Seung-hwan CHANG. PVDF-based ferroelectric polymers and dielectric elastomers for sensor and actuator applications: a review. *Functional Composites and Structures* [online]. 2019, **1**(1), 012003 [cit. 2020-06-16]. DOI: 10.1088/2631-6331/ab0f48.
- [19] MAHADEVA, Suresha K, John BERRING, Konrad WALUS a Boris STOEBER. Effect of poling time and grid voltage on phase transition and piezoelectricity of poly(vinylidene fluoride) thin films using corona poling. *Journal of Physics D: Applied Physics* [online]. 2013, **46**(28), 285305 [cit. 2020-06-17]. DOI: 10.1088/0022-3727/46/28/285305. ISSN 0022-3727.
- [20] XU, Jiachen, Maxwell ABECASSIS, Zixuan ZHANG, Ping GUO, Jiaxing HUANG, Kornel EHMANN a Jian CAO. *Accuracy Improvement of Nano-fiber Deposition by Near-Field Electrospinning* [online]. 2014, , 1-7 [cit. 2020-06-17].
- [21] LI, Xue, Yee-Fun LIM, Kui YAO, Francis Eng Hock TAY a Kar Heng SEAH. Ferroelectric Poly(vinylidene fluoride) Homopolymer Nanotubes Derived from Solution in Anodic Alumina Membrane Template. *Chemistry Of Materials* [online]. AMER CHEMICAL SOC, 2013, **25**(4), 524-529 [cit. 2020-06-17]. DOI: 10.1021/cm3028466. ISSN 0897-4756.

-
- [22] KIM, Hoejin, Torres FERNANDO, Mingyue LI, Yirong LIN a Tzu-Liang Bill TSENG. Fabrication and characterization of 3D printed BaTiO₃/PVDF nanocomposites. *Journal of Composite Materials* [online]. London, England: SAGE Publications, 2018, **52**(2), 197-206 [cit. 2020-06-17]. DOI: 10.1177/0021998317704709. ISSN 0021-9983.
 - [23] ANAND, Abhishek a M.C BHATNAGAR. Role of vertically aligned and randomly placed zinc oxide (ZnO) nanorods in PVDF matrix: Used for energy harvesting. *Materials Today Energy* [online]. Elsevier, 2019, **13**, 293-301 [cit. 2020-06-17]. DOI: 10.1016/j.mtener.2019.06.005. ISSN 2468-6069.
 - [24] KIM, Minji, Yuen Shing WU, Edwin C KAN, Jintu FAN a Minji KIM. Breathable and Flexible Piezoelectric ZnO@PVDF Fibrous Nanogenerator for Wearable Applications. *Polymers* [online]. 2018, **10**(7) [cit. 2020-06-17]. DOI: 10.3390/polym10070745.
 - [25] KRISHNAN, Srinivasan, Ravisankar TADIBOYINA, Murthy CHAVALI, et al. Graphene-Based Polymer Nanocomposites for Sensor Applications. *Hybrid Nanocomposites: Fundamentals, Synthesis, and Applications*. 1. CRC Press, 2019, s. 1-62. DOI: 10.1201/9780429000966-1. ISBN 9789814800341.
 - [26] KIM, Gwang Ho, Soon Man HONG a Yongsok SEO. Piezoelectric properties of poly(vinylidene fluoride) and carbon nanotube blends: β -phase development. *Physical Chemistry Chemical Physics* [online]. 2009, **11**(44), 10506-10512 [cit. 2020-06-17]. DOI: 10.1039/b912801h. ISSN 1463-9076.
 - [27] FERREIRA, Armando a S. LANCEROS-MENDEZ. Piezoresistive response of spray-printed carbon nanotube/poly(vinylidene fluoride) composites. *Composites Part B* [online]. Elsevier, 2016, **96**, 242-247 [cit. 2020-06-17]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.03.098. ISSN 1359-8368.
 - [28] GEORGOUSIS, G., C. PANDIS, A. KALAMIOTIS, et al. Strain sensing in polymer/carbon nanotube composites by electrical resistance measurement. *Composites Part B* [online]. Elsevier, 2015, **68**, 162-169 [cit. 2020-06-17]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.08.027. ISSN 1359-8368.
 - [29] LEO, Donald J. *Engineering Analysis of Smart Material Systems*. Hoboken: John Wiley&Sons, 2007. ISBN 978-0-471-68477-0.
 - [30] Permittivity. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Permittivity>
 - [31] APC International, Ltd. [online]. 2016 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectric-constants.html>
 - [32] GUSAROV, Boris. *PVDF piezoelectric polymers: characterization and application to thermal energy harvesting*. Grenoble, 2015. Doctoral school in electronics, electrical

- engineering, automation, signal processing. University of Grenoble. Vedoucí práce Orpheus Cugat, Bernard Viala, Leticia Gimeno Monge.
- [33] MADOU, Marc J. Fundamentals of Microfabrication and Nanotechnology: From MEMS to bio-MEMS and bio-NEMS; Manufacturing Techniques and Applications; 3rd ed. *Reference and Research Book News* [online]. Portland: Ringgold, 2011, **26**(6), 1-1992 [cit. 2020-06-18]. ISSN 08873763.
 - [34] XU, Ruize a Sang-Gook KIM. *Figures of Merits of Piezoelectric Materials in Energy Harvesters* [online]. 2012, , 464-467 [cit. 2020-06-18].
 - [35] PONNAMMA, D., K.K SADASIVUNI, J.-J. CABIBIHAN a M.A.A. AL-MAA-DEED. Smart Polymer Nanocomposites: Energy Harvesting, Self-Healing and Shape Memory Applications. 1. Cham: Springer International Publishing, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-50424-7. ISBN 978-3-319-50423-0.
 - [36] SONG, Jundong, Guanxing ZHAO, Bo LI a Jin WANG. Design optimization of PVDF-based piezoelectric energy harvesters. *Heliyon* [online]. Elsevier, 2017, **3**(9), 1-18 [cit. 2020-06-18]. DOI: 10.1016/j.heliyon.2017.e00377. ISSN 2405-8440.
 - [37] *Properties of AIRMAR Piezof LEX: Piezoelectric Polymer*. Dostupné také z: <http://www.airmar.com/images/uploads/AirPDF/Piezoflex.pdf>
 - [38] *Goodfellow Cambridge Ltd.* [online]. 2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <http://www.goodfellow.com/E/Polyvinylidene fluoride-Film.html>
 - [39] VARADAN, Vijay K., Kalarickaparambil Joseph VINOY a Sankaraiyer GOPALAKRISHNAN. *Smart Material Systems and MEMS: Design and Development Methodologies*. John Wiley, 2006. ISBN 9780470093610.
 - [40] *A MEMS Clearinghouse® and information portal for the MEMS and Nanotechnology community: Material: Barium Titanate (BaTiO₃), bulk* [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <http://memsnet.org/material/bariumtitanatebatio3bulk/>
 - [41] SCHWARTZ, Mel. *Smart materials*. Boca Raton: CRC Press, 2008, 1 sv. (různé stránkování). ISBN 978-1-4200-4372-3.
 - [42] GAO, J., D. XUE, W. LIU, C. ZHOU a X. REN. Recent progress on BaTiO₃-based piezoelectric ceramics for actuator applications. *Actuators* [online]. MDPI, 2017, **6**(3), 1-21 [cit. 2020-06-18]. DOI: 10.3390/act6030024. ISSN 20760825.
 - [43] HOOKER, Matthew W. *Properties of PZT-Based Piezoelectric Ceramics Between -150 and 250 C - NASA/CR-1998-208708* [online]. Hampton, Virginia: Lockheed Martin Engineering & Sciences Co., 1998, , 1-28 [cit. 2020-06-18].
 - [44] *A MEMS Clearinghouse® and information portal for the MEMS and Nanotechnology community: Material: Lead Zirconate Titanate (PZT)* [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.memsnet.org/material/leadzirconatetitanatepzt>

-
- [45] *Smart Material Corp.: MFC Engineering Properties* [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.smart-material.com>
- [46] CHIU, Yi-yuan, Wan-ying LIN, Hsin-yao WANG, Song-bin HUANG a Min-hsien WU. Development of a piezoelectric polyvinylidene fluoride (PVDF) polymer-based sensor patch for simultaneous heartbeat and respiration monitoring. *Sensors & Actuators: A. Physical* [online]. Elsevier B.V, 2013, **189**, 328-334 [cit. 2020-06-18]. DOI: 10.1016/j.sna.2012.10.021. ISSN 0924-4247.
- [47] LEI, Kin-fong, Yi-zheng HSIEH, Yi-yuan CHIU, Min-hsien WU a Kin-fong LEI. The Structure Design of Piezoelectric Poly(vinylidene Fluoride) (PVDF) Polymer-Based Sensor Patch for the Respiration Monitoring under Dynamic Walking Conditions. *Sensors (Basel, Switzerland)* [online]. 2015, **15**(8), 18801-18812 [cit. 2020-06-18]. DOI: 10.3390/s150818801.
- [48] HU, Yaohui, Wuwei KANG, Yong FANG, Lingrui XIE, Longzhen QIU a Tao JIN. Piezoelectric Poly(vinylidene fluoride) (PVDF) Polymer-Based Sensor for Wrist Motion Signal Detection. *Applied sciences* [online]. MDPI, 2018, **8**(5), 836 [cit. 2020-06-19]. DOI: 10.3390/app8050836.
- [49] PAN, Cheng-tang, Chun-chieh CHANG, Yu-sheng YANG, Chung-kun YEN, Yu-hsuan KAO a Yow-ling SHIUE. Development of MMG sensors using PVDF piezoelectric electrospinning for lower limb rehabilitation exoskeleton. *Sensors and Actuators: A. Physical* [online]. Elsevier B.V, 2020, **301**, 1-13 [cit. 2020-06-19]. DOI: 10.1016/j.sna.2019.111708. ISSN 0924-4247.
- [50] SHIRAFUJI, Shouhei a Koh HOSODA. Detection and prevention of slip using sensors with different properties embedded in elastic artificial skin on the basis of previous experience. *Robotics and Autonomous Systems* [online]. Elsevier B.V, 2014, **62**(1), 46-52 [cit. 2020-06-19]. DOI: 10.1016/j.robot.2012.07.016. ISSN 0921-8890.
- [51] HOSODA, Koh, Yasunori TADA a Minoru ASADA. Anthropomorphic robotic soft fingertip with randomly distributed receptors. *Robotics and Autonomous Systems* [online]. Elsevier B.V, 2006, **54**(2), 104-109 [cit. 2020-06-19]. DOI: 10.1016/j.robot.2005.09.019. ISSN 0921-8890.
- [52] JAMALI, Nawid a Claude SAMMUT. Material classification by tactile sensing using surface textures. In: *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation* [online]. IEEE, 2010, s. 2336-2341 [cit. 2020-06-19]. DOI: 10.1109/ROBOT.2010.5509675. ISBN 9781424450381. ISSN 10504729.
- [53] SOKHANVAR, S., M. PACKIRISAMY a J. DARGAHI. MEMS Endoscopic Tactile Sensor: Toward In-Situ and In-Vivo Tissue Softness Characterization. *IEEE Sensors Journal* [online]. IEEE, 2009, **9**(12), 1679-1687 [cit. 2020-06-19]. DOI: 10.1109/JSEN.2009.2025586. ISSN 1530-437X.
- [54] OKOSUN, F., P. CAHILL, B. HAZRA a V. PAKRASHI. Vibration-based leak detection and monitoring of water pipes using output-only piezoelectric

- sensors. *The European Physical Journal Special Topics* [online]. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, **228**(7), 1659-1675 [cit. 2020-06-19]. DOI: 10.1140/epjst/e2019-800150-6. ISSN 1951-6355.
- [55] SUN, P., Y. GAO, B. JIN a M. J. BRENNAN. Use of PVDF wire sensors for leakage localization in a fluid-filled pipe. *Sensors (Switzerland)* [online]. MDPI, 2020, **20**(3), 1-16 [cit. 2020-06-19]. DOI: 10.3390/s20030692. ISSN 14248220.
- [56] FITZGERALD, Paul C., Abdollah MALEKJAFARIAN, Basuraj BHOWMIK, et al. Scour Damage Detection and Structural Health Monitoring of a Laboratory-Scaled Bridge Using a Vibration Energy Harvesting Device. *Sensors (Basel, Switzerland)* [online]. 2019, **19**(11), 1-21 [cit. 2020-06-19]. DOI: 10.3390/s19112572.
- [57] AZHARI, Faezeh a Kenneth J. LOH. Laboratory validation of buried piezoelectric scour sensing rods. *Structural Control and Health Monitoring* [online]. 2017, **24**(9), 1-14 [cit. 2020-06-19]. DOI: 10.1002/stc.1969. ISSN 1545-2255.
- [58] CAHILL, Paul, Nathan JACKSON, Alan MATHEWSON a Vikram PAK-RASHI. PolyVinylidene Fluoride (PVDF) Material Based Energy Harvesting from Train and Damaged Bridge Interaction. In: *Key Engineering Materials* [online]. Trans Tech Publications, 2013, s. 335-341 [cit. 2020-06-19]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.569-570.335. ISBN 9783037857960. ISSN 1013-9826.
- [59] SONG, Ying a Baochen SUN. Recognition of Wheel Polygon Based on W/R Force Measurement by Piezoelectric Sensors in GSM-R Network. *Wireless Personal Communications* [online]. New York: Springer US, 2018, **102**(2), 1283-1291 [cit. 2020-06-19]. DOI: 10.1007/s11277-017-5194-z. ISSN 0929-6212.
- [60] *Transportation Safety Board of Canada: Railway Investigation Report R11D0099* [online]. [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://tsb.gc.ca/eng/rapports-report-s/rail/2011/r11d0099/r11d0099.html>
- [61] YING, Song, Wang ZHI-CHEN a Du YAN-LIANG. Continuous Measurement of Lateral Wheel/rail Interaction Force Based on PVDF Strain Sensing Technology. *Information Technology Journal* [online]. 2013, **12**(20), 5818-5823 [cit. 2020-06-19]. DOI: 10.3923/itj.2013.5818.5823. ISSN 1812-5638.
- [62] ZHANG, S. L., C. G. KOH a K. S. C. KUANG. Proposed rail pad sensor for wheel-rail contact force monitoring. *Smart Materials and Structures* [online]. 2018, **27**(11), 2-10 [cit. 2020-06-19]. DOI: 10.1088/1361-665X/aadc8d. ISSN 0964-1726.
- [63] KUTIŠ, Vladimír, Justín MURÍN, Juraj PAULECH a Vladimír GOGA. *Metóda konečných prvků v mechatronice I: Úvod do programu ANSYS*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave v Nakladatelství STU, 2013.
- [64] TYC, Tomáš. *Teoretická mechanika: poznámky k přednáškám*. Ústav teoretické fyziky a astrofyziky, Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, 2019. Dostupné z: <https://www.physics.muni.cz/tomtyc>

- [65] FLORES-DOMÍNGUEZ, M. Modeling of the Bending Stiffness of a Bimaterial Beam by the Approximation of One-Dimensional of Laminated Theory. *Journal of Engineering Research and Applications* [online]. Directory of Open Access Journals, 2014, 4(3), 492-497 [cit. 2020-06-20]. ISSN 2248-9622.
- [66] *Počítačové metody mechaniky v dynamice: Problém vlastních hodnot* [online]. 2008 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/pkrejci/opory/pmm_dyn/opora.html?fbclid=IwAR1HNct5aK4a4BeC6QMbjl3Xai-jgfUukw8z2Eq6fNi5HJ-2YPd0hNqKMhA
- [67] BREPTA, Rudolf, Ladislav PŮST a František TUREK. *Mechanické kmitání*. Praha: Sobotáles, 1994, 589 s. : il. ISBN 80-901684-8-5.
- [68] ERTURK, A. *Electromechanical Modeling of Piezoelectric Energy Harvesters*, 2009.

Zoznam použitých symbolov a skratiek

Skratka	Popis
CNT	carbon nanotubes
DOF	degree of freedom
EKG	elektrokardiogram
FEM	finite element method
FFES	far field electro spinning
FFT	fast fourier transform
MEMS	microelectromechanical systems
MFC	macro fiber composite
MKP	metóda konečných prvkov
MMG	mechanomyogram
MWCNT	multiwalled carbon nanotube
NDOF	N degrees of freedom
NFES	near field electro spinning
PCB	printed circuit board
SDOF	single degree of freedom
SEM	scanning electron microscope
SNR	signal to noise ratio
TGTG	trans-gauche-trans-gauche'
T3GT3G'	trans3-gauche-trans3-gauche'

Symbol	Jednotka	Popis
A_0	$[ms^{-2}]$	amplitúda zrýchlenia základne
A_e	$[kg]$	jednotková hmotnosť elementu
b	$[m]$	šírka nosníka
b_e	$[m]$	šírka elektródy
\mathbf{c}	$[Pa]$	matica tuhosti
\mathbf{C}	$[Nsm^{-1}]$	globálna matica tlmenia
\mathbf{c}^E	$[Pa]$	matica tuhosti pri konštantnej intenzite elektrického poľa
\mathbf{c}^D	$[Pa]$	matica tuhosti pri konštantnej hustote náboja
C_p	$[F]$	kapacita piezoelektrickej vrstvy
\mathbf{d}	$[C/N]$	matica piezoelektrických nábojových konštánt
\mathbf{D}	$[Nm]$	matica hustoty elektrického náboja
d_{ij}	$[C/N]$	piezoelektrická nábojová konštanta
\mathbf{E}	$[Vm^{-1}]$	matica intenzity elektrického poľa
e_{ij}	$[Cm^{-1}]$	piezoelektrická konštanta
EJ	$[Nm^2]$	ohybová tuhosť kompozitu SDOF
EJ_e	$[Nm^2]$	ohybová tuhosť elementu
E_{ij}	$[Pa]$	modul pružnosti v ťahu pre daný smer i,j
E_k	$[J]$	kinetická energia
E_p	$[J]$	potenciálna energia
EJ_{sp}	$[Nm^2]$	ohybová tuhosť kompozitu piezo a substrát
\mathbf{f}	$[N]$	vektor budiacej sily
\mathbf{g}	$[VmN^{-1}]$	matica piezoelektrických napäťových konštánt
g_{ij}	$[VmN^{-1}]$	piezoelektrická napäťová konštanta
h_s	$[m]$	hrúbka substrátu
h_p	$[m]$	hrúbka piezo vrstvy
h_{ij}	$[Vm^{-1}]$	piezoelektrická konštanta
i	$[-]$	smer polarizácie
j	$[-]$	smer pôsobenia sily
\mathbf{k}	$[-]$	matica k-faktorov
\mathbf{K}	$[Nm^{-1}]$	globálna matica tuhosti
\mathbf{k}_e	$[Nm^{-1}]$	matica tuhosti elementu
k_{ekv}	$[Nm^{-1}]$	ekvivalentná tuhosť
k_{ij}	$[-]$	k-faktor

L	$[m]$	délka nosníka
l_e	$[m]$	délka elementu
L_e	$[m]$	délka elektródy
M	$[kg]$	hmotnosť kompozitu piezo a substrát
\mathbf{M}	$[kg]$	globálna matica hmotnosti
\mathbf{m}_e	$[kg]$	matica hmotnosti elementu
m_{ekv}	$[kg]$	ekvivalentná hmotnosť
m_z	$[kg]$	hmotnosť závažia
\mathbf{Q}	$[C]$	vektor elektrického náboja
R_z	$[\Omega]$	odporová záťaž
\mathbf{s}	$[Pa^{-1}]$	matica poddajnosti
\mathbf{S}	$[\Delta mm^{-1}]$	matica mechanického pretvorenia
\mathbf{s}^E	$[Pa^{-1}]$	matica poddajnosti pri konštantnej intenzite elektrického poľa
\mathbf{T}	$[Pa]$	matica mechanického napätia
$\tan(\delta)$	$[-]$	stratový činiteľ
T_{max}	$[^{\circ}C]$	maximálna operačná teplota
u	$[m]$	posuv v uzle vo fyzikálnych súradniciach
\mathbf{u}	$[m]$	vektor posuvu vo fyzikálnych súradniciach
$\dot{\mathbf{u}}$	$[ms^{-1}]$	vektor rýchlosti vo fyzikálnych súradniciach
$\ddot{\mathbf{u}}$	$[ms^{-2}]$	vektor zrýchlenia vo fyzikálnych súradniciach
\mathbf{u}_e	$[m]$	vektor uzlových posuvov elementu
U_0	$[m]$	amplitúda výchylky voľného konca vo fyzikálnych súradniciach
\mathbf{u}_{0i}	$[m]$	vlastný vektor i-teho módu
\mathbf{v}	$[V]$	vektor elektrického napätia
$\dot{\mathbf{v}}$	$[V]$	vektor derivácie elektrického napätia
V_0	$[V]$	amplitúda elektrického napätia
W_e	$[J]$	elektrická energia pieza
W_{ext}	$[J]$	práca vykonaná externými silami
x_1	$[m]$	vzdialenosť od votknutia, začiatok elektródy
x_2	$[m]$	vzdialenosť od votknutia, koniec elektródy
\mathbf{Y}	$[Pa]$	matica tuhosti
Y_{ij}	$[Pa]$	modul pružnosti v ťahu pre smer ij
Y_s	$[Pa]$	modul pružnosti v ťahu substrátu
Y_p	$[Pa]$	modul pružnosti v ťahu piezoelektrickej vrstvy

z_n	$[m]$	neutrálna os
z_{Tp}	$[m]$	vzdialenosť ťažiska prierezu piezo vrstvy od geometrického stredu kompozitu
α	$[-]$	kryštalická fáza PVDF
α_R	$[-]$	Rayleighov koeficient tlmenia
β	$[-]$	kryštalická fáza PVDF
β_R	$[-]$	Rayleighov koeficient tlmenia
γ	$[-]$	kryštalická fáza PVDF
δ	$[-]$	kryštalická fáza PVDF
δ_{dekr}	$[-]$	logaritmický dekrement
ϵ^T	$[F]$	matica absolútnej permtivity pri konštantnom napätí
ϵ_r	$[-]$	relatívna permitivita materiálu
ϵ_0	$[Fm^{-1}]$	permitivita vákua
η	$[-]$	Poissonovo číslo
ϑ	$[]$	člen elektromechanickej premeny
Θ	$[]$	globálna matica elektromechanického člena premeny
ξ	$[-]$	pomerný útlm
ρ	$[kgm^{-3}]$	hustota
ρ_e	$[kgm^{-3}]$	hustota elementu
ϕ_1	$[-]$	prvý modálny tvar sústavy
Ω_b	$[rads^{-1}]$	budiaca frekvencia
ω_1	$[rads^{-1}]$	prvá vlastná frekvencia sústavy
ω_1	$[rads^{-1}]$	vektor vlastných frekvencií systému

Zoznam obrázkov

1.1	Piezoelektrický senzor z PVDF fólie [1].	17
2.1	Rozličné javy v materiáloch [2].	19
2.2	Schéma priameho (hore) a inverzného (dole) piezoelektrického javu [3]. . .	19
2.3	Usporiadanie kryštalických a amorfných oblastí PVDF polyméru. Zlava: po tepelnej úprave, po mechanickom ťahaní, po elektrickom polarizovaní [11].	21
2.4	Kompozit PZT a polyméru pomocou vlákien (vľavo) a pomocou nanočastíc (vpravo) [14].	22
2.5	Proces polarizovania materiálu. Zlava: pred, počas a po polarizácii [15]. . .	22
2.6	Konvencia smerov (vľavo) [8] a namáhanie v móde 31 a 33 [16].	23
3.1	Konformácie reťazcov α , β , γ fázy v PVDF [9].	25
3.2	SEM obrázok PVDF fólie bez úpravy a po ťažovaní [19].	26
3.3	Porovnanie metód elektrostatického zvlákňovania: FFES (vľavo), NFES (vpravo) [20].	26
3.4	Schéma PVDF vytvárajúceho nanotrubic v matrici a SEM fotografia mat- rice a polymérnych PVDF nanotrubíc bez matrice [21].	27
3.5	Rozloženie BTO v kompozite závislé na procese výroby [22].	28
3.6	Kompozity zložené z PVDF a ZnO [23, 24]	29
3.7	Grafén a ďalšie modifikácie uhlíka [25].	29
3.8	Závislosť d_{33} na podiele nanotrubíc v polarizovanom kompozite a v polari- zovanom natiahnutom kompozite [26].	30
3.9	Prepojenie elektrických a mechanických veličín [32].	32
4.1	Senzorická náplast. Vrstvy zhora: PDMS, PVDF, Mylar [46].	35
4.2	Porovnanie srdečnej a dýchacej frekvencie [46].	35
4.3	Vylepšenie senzora pre dynamický pohyb [47].	36
4.4	Štruktúra snímača (vľavo) a detekcia pohybu z výstupu snímača (vpravo) [48].	36
4.5	Schéma MMG senzora z PVDF mikrovlákien a rehabilitačný prístroj [49]. .	37
4.6	Štruktúra robotického prsta snímajúceho tlak a šmyk [50].	37
4.7	Návrh endoskopického ramena a detekcia uchopeného objektu [53].	38
4.8	Závislosť napätia na veľkosti diery a prietoku dvoch snímačov [54].	39
4.9	Štruktúra PVDF kábla a aplikácia na potrubie pod vodou [55].	39
4.10	Štruktúra hornej časti piliera, umiestnenie senzorov a schéma numerického modelu [56].	40
4.11	Schéma uloženia snímačov. So zmenou hĺbky koryta sa mení dĺžka snímača [57].	41
4.12	Model mosta a pokles výkonu v závislosti na rozsahu poškodenia [58]. . . .	42
4.13	Sily pri kontakte kolesa s koľajnicou [60].	42
4.14	Rez snímačom a detekcia poškodeného kolesa vagóna [62].	43
5.1	Piezoelektrický nosník ako modelovaná súčasť testovacieho prípravku. . . .	45
5.2	Stupne voľnosti 2D elementu nosníka pre ohyb.	46
5.3	Piezoelektrický nosník v modálnej analýze Ansys Workbench.	52
6.1	Simulácia časovej odozvy výchylky a napätia.	56
6.2	Porovnanie modelov v napäťovej odozve tlmených kmitov.	56

6.3	Porovnanie modelov v napätovej odozve na kinematick budenie.	57
7.1	Aparát pre stanovenie piezoelektrických vlastností.	59
7.2	Prevedenie spojenia vrstiev a vzorky PVDF fólie.	60
7.3	Závislosť amplitúdy napätia na amplitúde zrýchlenia, $R_z = 10 \text{ M}\Omega$	60
7.4	Naptov odozva na rôzne kinematick budenie prvej vzorky, $R_z=10 \text{ M}\Omega$. .	62
7.5	Naptov odozva na rôzne kinematick budenie druhej vzorky, $R_z=10 \text{ M}\Omega$. .	62
7.6	Výkon pri rôznom kinematicom budn prvej vzorky, $R_z=10 \text{ M}\Omega$	63
7.7	Výkon pri rôznom kinematicom budn druhej vzorky, $R_z=10 \text{ M}\Omega$	63
8.1	Schéma metódy určovania piezoelektrických vlastností z napätia a z frekvencie.	65
8.2	Porovnanie: reprodukovn napätie z vypočítanej konstanty a meranie. . .	66
8.3	Elektromechanick analógia.	67
8.4	Blokov schéma výpočtu pomocou merania napätia a rýchlosti.	67
8.5	Amplitúdovo frekvenn charakteristika druhej vzorky.	68

Zoznam tabuliek

3.1	Výplne PVDF zlepšujúce piezoelektrické vlastnosti [9].	27
3.2	Porovnanie mechanických, elektrických a piezoelektrických vlastností PVDF.	33
3.3	Porovnanie vlastností zástupcov zo skupín piezoelektrických materiálov.	34
4.1	Hodnoty vlastných frekvencií vychádzajúce z výkonovej spektrálnej hustoty napätového signálu.	40
6.1	Vlastnosti PVDF použité v simuláciách.	55
7.1	Parametre testovaných a modelovaných piezoelektrických nosníkov.	61
8.1	Piezoelektrické vlastnosti z merania napätového výstupu a porovnanie vý- sledkov.	66
8.2	Porovnanie modelov s meraním a piezoelektrické konštanty z merania na- pätia a rýchlosti.	67
8.3	Porovnanie výsledku s výrobcom	69

Prílohy

A Priložené súbory

MATLAB_SIMULINK_MODEL

- MODEL_Y_PLOT_MAIN
- NDOF.m
- SDOF.m
- SDOF_model_TR.slx
- dáta z NDOF.m, SDOF.m a SDOF_model_TR.slx
- readme.txt

PIEZO_VLASTNOSTI_MERANIE

- PIEZO_KONSTANTY_MAIN.m
- couplingNDOF.m
- couplingSDOF.m
- namerané dáta
- readme.txt